

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Rita KLEIZIENĖ

NESTANDŽIOS DANGOS KONSTRUKCIJOS MODELIAVIMAS ĮVERTINANT TAMPRIAI KLAMPIAS ASFALTO SAVYBES

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
STATYBOS INŽINERIJA (02T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2016

Disertacija rengta 2012–2016 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Vadovai

doc. dr. Audrius VAITKUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – 02T) (2014–2016),
prof. dr. Donatas ČYGAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – 02T) (2012–2014).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Statybos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

doc. dr. Darius BAČINSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – 02T).

Nariai:

prof. habil. dr. Juozas ATKOČIŪNAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – 02T),
dr. Viktors HARITONOVŠ (Rygos technikos universitetas, Latvija, statybos inžinerija – 02T),
prof. dr. Terhi PELLINEN (Aalto universitetas, Suomija, statybos inžinerija – 02T),
dr. Saulius VAITKUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, medžiagų inžinerija – 08T).

Disertacija bus ginama viešame Statybos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2016 m. gruodžio 9 d. 13 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2016 m. lapkričio 8 d.

Disertaciją galima peržiūrėti VGTU talpykloje <http://dspace.vgtu.lt> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2392-M mokslo literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-457-970-7

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2016

© Rita Kleizienė, 2016

rita.kleiziene@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Rita KLEIZIENĖ

DESIGN OF FLEXIBLE PAVEMENT BASED ON ASPHALT VISCO-ELASTIC PROPERTIES

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
CIVIL ENGINEERING (02T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2016

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2012–2016.

Supervisors

Assoc. Prof. Dr Audrius VAITKUS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – 02T) (2014–2016),

Prof. Dr Donatas ČYGAS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – 02T) (2012–2014).

The Dissertation Defence Council of Scientific Field of Civil Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Assoc. Prof. Dr Darius BAČINSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – 02T).

Members:

Prof. Dr Habil Juozas ATKOČIŪNAS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – 02T),

Dr Viktors HARITONOVŠ (Riga Technical University, Latvia, Civil Engineering – 02T),

Prof. Dr Terhi PELLINEN (Aalto University, Finland, Civil Engineering – 02T),

Assoc. Prof. Dr Saulius VAITKUS (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – 08T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defense Council of Civil Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **1 p. m. on 9 December 2016**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 8 November 2016.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at VGTU repository <http://dspace.vgtu.lt> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Reziumė

Nestandi dangos konstrukcija – tai vieno ar daugiau asfalto sluoksnių danga paklota ant surištų ar nesurištų pagrindo sluoksnių. Nors visi dangos konstrukcijos sluoksniai yra vienodai svarbūs eksploatacijos metu, asfalto danga turi didelę įtaką konstrukcijos funkcionavimui. Asfalto sluoksniai sudaryti iš sutankinto kompozitinių medžiagų mišinių, surišto organinės kilmės bituminiu rišikliu. Šio rišiklio, taip pat ir asfalto mišinio, savybės kinta priklausomai nuo aplinkos ir apkrovų sąlygų – tai nulemia visos dangos konstrukcijos laikomąją gebą. Todėl tampriai klampios asfalto mišinio savybės ir jų kitimas turi būti įvertinti dangos konstrukcijos projektavimo stadijoje, nustatant ir optimizuojant visos dangos konstrukcijos sluoksnių storius ir medžiagų rūšis pagal jų poveikį kitų sluoksnių bei visos dangos konstrukcijos funkcionavimui.

Disertacijoje nagrinėjamas dinaminių ciklinių apkrovų poveikis prie skirtingų temperatūrų asfalto mišinio ir bitumo tampriai klampioms savybėms. Asfalto sluoksnių tampriai klampių savybių tyrimo metodika pritaikyta tiek naujoms, tiek ir eksploatuojamoms kelių tiesybos medžiagoms. Asfalto mišinius bandant laboratorijoje naudojami naujai pagaminti bei iš eksploatuojamo kelio (2007 m.) paimti asfalto sluoksnių ėminiai. Eksperimentu atlikti tyrimai asfalto mišinių tampriai klampių savybių nustatymui dviem būdais: asfalto mišinius bandant laboratorijoje netiesioginio tempimo metodu; ir savybes nustatant iš teorinių skaičiavimų. Tiriamas asfalto mišinių ir bitumo dinaminis tamprumo ir šlyties moduliai nuo skirtingo dažnio dinaminių apkrovų tiesiškai tampriai klampiose deformacijų ribose esant skirtingoms temperatūroms. Disertacijos rezultatai apima asfalto dangos konstrukcijos funkcionavimo įvertinimo algoritmo sukūrimą ir būtinųjų įvesties duomenų nustatymą.

Disertacija sudaryta iš įvado, trijų skyrių, santraukos anglų kalba ir septynių priedų. Pirmajame skyriuje aprašyti Lietuvoje ir užsienio šalyse taikomi asfalto dangų konstravimo metodai ir duomenų poreikis. Analizuojami kelių tiesybos medžiagų tamprių ir tampriai klampių mechaninių savybių nustatymo metodai. Antrajame skyriuje pateiktas asfalto mišinių ir jų sudedamųjų dalių eksperimentinis tyrimas, rezultatų analizė ir vertinimas. Pritaikytas ir patikslintas Hirsch modelis asfalto mišinių dinaminio tamprumo modulio apskaičiavimui pagal mišinio sudedamąsias dalis ir bitumo dinaminį šlyties modulį. Susisteminti įvesties duomenys dangos konstrukcijos pažangių projektavimo metodikų taikymui. Trečiasis skyrius skirtas dangos konstrukcijos reakcijos nuo statinės ir judančios apkrovos skaičiavimams taikant eksperimentu nustatytas asfalto mišinių tamprias ir tampriai klampias savybes. Taikant skirtingus dangos konstrukcijos projektavimo metodus ir įvesties duomenis atliktas dangos konstrukcijos optimizavimas ir nustatytas ekonominis efektyvumas.

Abstract

Flexible pavement is a structure composed of one or more asphalt layers laid on compacted bound and unbound base layers. Even though every layer of pavement is important and affects exploitation, the asphalt surface has the most influence on pavement performance. Asphalt layers are compacted special composition aggregate mixtures bound with bitumen (asphalt binder). Bitumen properties, as well as asphalt mixture properties, vary depending on temperature and loading conditions. These variations influence entire pavement bearing capacity. The visco-elastic properties of asphalt mixtures, as well as their ranges, have to be evaluated in pavement design. This has to be done by determining the proper pavement layers thicknesses and selecting structure materials according to their influence on other layers and entire pavement performance.

Dissertation analyses the influence of the dynamic cyclic load on visco-elastic properties of asphalt mixture, bitumen binder, as well as pavement structure performance under different temperature conditions. The visco-elastic properties determined for new and aged asphalt mixtures, the latter were cored from pavement exploited since 2007. Two determination methods of the dynamic modulus of asphalt mixtures were analysed: performing the dynamic indirect tension test and estimating from a theoretical model. The dynamic modulus of asphalt mixtures and dynamic shear modulus of bitumen were tested under linear visco-elastic range at different load frequencies and temperatures. The research results include development of a flexible pavement performance algorithm and specification of input data.

The dissertation consists of an introduction, three chapters, a summary in English, and seven annexes. Chapter 1 contains a review of pavement design methods in Lithuania and other countries as well as input data needs. Pavement layer elastic and visco-elastic mechanical property determination method research works are analysed. Chapter 2 subjected the experimental research and applied methods of asphalt mixtures and their components to data interpretation and analysis. The Hirsch model application for dynamic modulus estimation of asphalt mixtures was investigated and calibrated. The input data for visco-elastic pavement response and performance analysis were systemized and prepared for advanced pavement design application. Chapter 3 determines flexible pavement response and performance under static and moving load modelling applying elastic and visco-elastic properties of asphalt mixtures. The economical evaluation was calculated comparing different pavement design methods and pavement structure optimization.

Žymėjimai

Simboliai

f arba ω – dažnis, Hz arba rad/s;

ε – deformacija, m/m arba %;

R^2 – determinacijos koeficientas;

E^* – dinaminis arba kompleksinis tamprumo modulis, nustatytas esant ciklinei apkrovai, MPa ;

φ – fazės kampas, ° arba rad;

σ_D – imties dispersija;

σ – įtempimai, Pa;

E'' – klampioji dinaminio modulio dedamoji arba nuostolio modulis (*angl. Loss modulus*);

G^* – kompleksinis šlyties modulis, MPa;

t – laikas, s;

λ – Lamė koeficientas $\lambda = \frac{E \cdot \nu}{(1 + \nu)(1 + 2\nu)}$;

T_m – minkštėjimo temperatūra, °C;

Pen – penetracija, mm^{-1} ;

a_T – perslinkimo koeficientas, -;

I_p – penetracijos indeksas, -;

ν – Puasono koeficientas, -;

f_R arba ω_R – redukuotasis dažnis prie referencinės temperatūros, -;

T_{ref} – referencinė temperatūra, $^{\circ}C$;

R^* – koeficientas įvertinantis bitumo mechanines savybes, apskaičiuojamas pagal redukcijos funkciją įvertinant bitumo adatos penetraciją;

$E(t)$ – relaksacijos modulio funkcija, tamprumo modulio priklausomybė nuo laiko arba dažnio veikiant relaksacijos procesams esant pastoviems įtempimams, MPa ;

K – standumo (spūdumo/tūrio) modulis, MPa;

G – šlyties modulis, MPa;

γ – šlyties (kampinė) deformacija, m/m arba %;

τ – šlyties įtempimai, Pa;

E' – tamprioji dinaminio modulio dedamoji arba akumuliacijos modulis (*angl. Storage modulus*);

E – tamprumo modulis, MPa ;

T – temperatūra, $^{\circ}C$;

$D(t)$ – valkšnumo modulio funkcija, tamprumo modulio priklausomybė nuo laiko arba dažnio veikiant valkšnumo procesams esant pastovioms deformacijoms, MPa;

μ – vidurkis;

S_r – vidutinis standartinis nuokrypis;

Santrumpos

AASHTO – Jungtinių Amerikos Valstijų greitkelių ir transporto asociacija (*angl. American Association of State Highway and Transportation Officials*);

AC – Asfaltbetonis (*angl. Asphalt concrete*);

BEM – Baigtinių elementų metodas (*angl. FEM - Finite element method*);

CI – Patikimumo intervalas (*angl. Confident interval*);

DEM – Diskretinių elementų metodas (*angl. DEM – Discrete (distinct) element method*);

DSR – Dinaminis šlyties areometras (*angl. Dynamic Shear Rheometer*);

DSTM – Daugiasluoksnis tamprus metodas (*angl. MLET – Multilayer elastic theory or method*);

ESM – Ekvivalentinio storio metodas (*angl. MET – Method of equivalent thickness*);

FGSV – Vokietijos kelių ir transporto tyrimo centras (*vok. FGSV – Die Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen*);

IDT – Netiesioginio tempimo bandymas (*anlg. IDT – Indirect Tension Test*);

LST – Lietuvos standartizacijos departamento standartas;

LTA – Asfalto mišinio ilgos trukmės sendinimas (*anlg. Long-term asphalt mixture ageing*);

LVE – Tiesiškai tampriai klampus būvis (*anlg. LVE – Linear viscoelastic behavior*);

MEPDG – Mechanistinis empirinis dangų konstrukcijų projektavimo gidas;

PMB – Polimerais modifikuotas bitumas (*anlg. Polymer modified binder*);

RTFOT – Atsparumo kietėjimui metodas, imituojantis trumpalaikį bitumo senėjimo procesą (*anlg. RTFOT – Rolling thin flim test*);

SEE – Skirtumų kvadratų suma (*anlg. Sum of square error*);

SMA – Skaldos mastikos asfaltas;

TTSP – Laiko-temperatūros superpozicijos principas (*anlg. Time Temperature Superposition Principle*);

VFB – Procentinis oro tuštymių kiekis mineraliniuose užpilduose užpildytas bituminiu rišikliu (*anlg. Void filled with binder*);

VMA – Procentinis oro tuštymių kiekis mineraliniuose užpilduose (*anlg. Void in the mineral aggregate*);

WLF – Perslinkimo koeficiento funkcija pagal Williams-Landel-Ferry.

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas.....	3
Darbo tikslas.....	3
Darbo uždaviniai	4
Tyrimų metodika	4
Darbo mokslinis naujumas	5
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	5
Ginamieji teiginiai.....	6
Darbo rezultatų aprobavimas.....	6
Disertacijos struktūra.....	7
Padėka	7
1. ASFALTO DANGOS KONSTRUKCIJOS MODELIAVIMO	
IR FUNKCIONAVIMO METODŲ ANALIZĖ	9
1.1. Automobilių kelių dangų konstravimo metodai	10
1.2. Asfalto dangos konstrukcijos funkcionavimo bei degradacijos samprata	13
1.2.1. Dangos konstrukcijos funkcionavimo prognozavimas ir vertinimas	14
1.2.2. Asfalto sluoksnių atsparumo nuovargiui vertinimas	16
1.2.3. Asfalto sluoksnių atsparumo plastinėms deformacijoms vertinimas	18

1.2.4. Nesurištų pagrindo sluoksnių ir žemės sankasos atsparumo liekamosioms deformacijoms vertinimas.....	19
1.3. Asfalto dangos konstrukcijos sluoksnių savybių ir modelių vertinimas.....	19
1.3.1. Dangos konstrukcijos reakcijos į apkrovas skaičiavimo samprata.....	20
1.3.2. Asfalto dangos konstrukcijos medžiagų savybių nustatymo ir vertinimo analizė.....	25
1.4. Automobilų kelių dangų konstravimo įvesties duomenų poreikis ir reikšmingumas	48
1.4.1 Aplinkos sąlygos ir klimatas	48
1.4.2 Automobilų transporto priemonių apkrovos	50
1.4.3 Dangos konstrukcijos sluoksnių medžiagų savybės.....	52
1.4.4 Modelis asfalto sluoksnių tampriai klampių savybių poveikio dangos konstrukcijos funkcionavimo įvertinimui	53
1.5. Pirmojo skyriaus išvados, disertacijos uždavinių formulavimas	55
2. ASFALTO TAMPRIAI KLAMPIŲ SAVYBIŲ NUSTATYMO EKSPERIMENTINIS TYRIMAS.....	57
2.1. Asfalto mišinių fizikinių ir mechaninių savybių eksperimentinis tyrimas	58
2.1.1. Tyrimo planas	58
2.1.2. Tyrimo metodika.....	62
2.2. Eksperimentinio tyrimo bandymo rezultatų analizė	69
2.2.1. Bitumo fizikinių savybių rezultatai.....	69
2.2.2. Asfalto mišinių fizikinių savybių rezultatai	70
2.2.3. Bitumo mechaninių savybių rezultatai.....	73
2.2.4. Asfalto mišinių mechaninių savybių rezultatai	79
2.3. Asfalto mechaninių savybių apskaičiavimas pagal mišinio komponentų savybes	84
2.3.1. Hirsch modelio koeficientų patikslinimas.....	86
2.3.2. Asfalto mišinių dinaminio tamprumo modulio apskaičiavimas taikant patikslintą Hirsch modelį	90
2.3.3. Patikslinto Hirsch modelio tinkamumo asfalto mechaninių savybių apskaičiavimui pagrindimas.....	91
2.4. Asfalto mišinių tampriai klampių savybių vertinimas	95
2.5. Antrojo skyriaus išvados	96
3. NESTANDŽIOS DANGOS KONSTRUKCIJOS MODELIAVIMAS IR FUNKCIONAVIMO PROGNOZAVIMAS	99
3.1. Asfalto dangos konstrukcijos reakcijos į apkrovą skaičiavimo įvesties duomenys	100
3.2. Asfalto dangos konstrukcijos reakcijos į apkrovą nustatymas ir funkcionavimo vertinimas.....	103
3.2.1 Dangos konstrukcijos reakcija į apkrovą įvertinant tamprias ir tampriai klampias savybes	103
3.2.2 Naujos ir eksploatuojamos dangos konstrukcijų funkcionavimo analizė ir vertinimas	106

3.3. Asfalto dangos konstrukcijų projektavimo metodų ekonominis vertinimas....	109
3.4. Trečiojo skyriaus išvados	114
BENDROSIOS IŠVADOS	117
REKOMENDACIJOS	119
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	121
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	139
SUMMARY IN ENGLISH.....	141
PRIEDAI ¹	159
A priedas. Sąvokos	160
B priedas. Bituminio rišiklio šlyties modulio ir fazės kampo kompleksinės kreivės	165
C priedas. Asfalto mišinių dinaminis tamprumo modulis prie skirtingų temperatūrų ir dažnių.....	169
D priedas. Apskaičiuotų asfalto mišinių dinaminio tamprumo modulio kompleksinės kreivės funkcijos.....	173
E priedas. Metinė ekonominė nauda vietoje standartizuotų dangos konstrukcijų naudojant optimizuotas konstrukcijas.....	177
F priedas. Bendraautorijų sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje.....	179
G priedas. Autorės mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos.....	191

¹ Priedai pateikti pridėtoje elektroninėje laikmenoje.

Contents

INTRODUCTION	1
Problem formulation	1
Relevance of the thesis	2
The object of research	3
The aim of the thesis	3
The tasks of the thesis	4
The research methodology	4
Scientific novelty of the thesis	5
Practical value of the research findings	5
Defended statements	6
Approval of the research findings	6
The structure of the dissertation	7
Acknowledgements	7
1. ANALYSIS OF THE ASPHALT PAVEMENT DESIGN AND PERFORMANCE	
METHODS	9
1.1. Design methods of the road pavement	10
1.2. Concept of asphalt pavement performance and deterioration	13
1.2.1. Forecast and verification of pavement performance	14
1.2.2. Assessment of asphalt layers resistance to fatigue	16
1.2.3. Assessment of asphalt layers resistance to permanent deformation	18
1.2.4. Assessment of unbound base layers and subgrade resistance to permanent deformation	19

1.3. Evaluation of materials properties and models of asphalt pavement.....	19
1.3.1. Calculation concept of pavement response to load	20
1.3.2. Determination and analysis methods of asphalt pavement properties....	25
1.4. Input data need and significant for pavement design	48
1.4.1. Climate and temperature conditions.....	48
1.4.2. Vehicle traffic loads	50
1.4.3. Materials properties of pavement layers	52
1.4.4. Model of visco-elastic asphalt properties influence on performance of pavement.....	53
1.5. First chapter conclusions, tasks formulation of the thesis	55
2. EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE ASPHALT VISCO-ELASTIC PROPERTIES DETERMINATION	57
2.1. Investigation of asphalt mixtures physical and mechanical properties	58
2.1.1. Plan of experimental research	58
2.1.2. Methodology of experimental research	62
2.2. Analysis of the experimental research results	69
2.2.1. Results of bitumen binder physical properties	69
2.2.2. Results of asphalt mixtures physical properties	70
2.2.3. Results of bitumen binder mechanical properties	73
2.2.4. Results of asphalt mixtures mechanical properties	79
2.3. Mechanical properties of asphalt mixture determination based on component properties	84
2.3.1. Revision of Hirsch model coefficients	86
2.3.2. Calculation of dynamic modulus of asphalt mixtures applying revised Hirsch model.....	90
2.3.3. Validation of revised Hirsch model relevance to determine the mechanical properties of asphalt mixtures.....	91
2.4. Analysis of visco-elastic properties of asphalt mixtures	95
2.5. Second chapter conclusions.....	96
3. DESIGN AND PERFORMANCE PREDICTION OF FLEXIBLE PAVEMENT	99
3.1. Input data for determination of asphalt pavement response to load	100
3.2. Estimation of response to load and performance of asphalt pavement.....	103
3.2.1. Pavement response to load under visco-elastic asphalt layers	103
3.2.2. Performance analysis of new and exploit pavement structures.....	106
3.3. Economical evaluation of design methods of asphalt pavement	109
3.4. Third chapter conclusions.....	114
GENERAL CONCLUSIONS	117
RECOMMENDATIONS	119
REFERENCES	121
THE LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION	139
SUMMARY IN ENGLISH.....	141

ANNEX ²	159
Annex A. Scientific terms descriptions	160
Annex B. Shear modulus and phase angle master curves of asphalt binder	165
Annex C. Dynamic modulus under different temperature and frequencies conditions of asphalt mixtures	169
Annex D. Master curve functions of determined dynamic modulus of asphalt mixtures	173
Annex E. Annual economic benefit of optimized asphalt pavement constructions compared with standard pavement	177
Annex F. Agreements of co-authors to provide published statements in the thesis	179
Annex G. Author's scientific publications on the topic of the thesis	191

² Annexes in the attached electronic medium.

Ivadas

Problemos formulavimas

Europos komisijos ekonomikos skatinimo strategijoje mobilumo ir susisiekimo efektyvinimas yra vieni iš pagrindinių prioritetinių krypčių. Šios kryptys neatsiejamoms nuo susisiekimo tinklo ir infrastruktūros priežiūros ir plėtros programos vystymo. Kelių tinklas ir infrastruktūra turi užtikrinti saugų, greitą ir patogų susisiekimą iš taško A į tašką B. Nors Lietuvos automobilių kelių tinklas vis labiau modernizuojamas ir plėtojamas, tačiau dėl lėšų stygiaus ne visuomet priimamai ekonomiškai efektyviausi sprendimai.

Kelių infrastruktūros ilgaamžiškumo aspekto dangos konstrukcijos laikomai geba užtikrinama bendraisiais sukibimo, pasipriešinimo riedėjimui, ilgaamžiškumo, lygumo, triukšmingumo, estetiškumo, ekonomiškumo ir kitais reikalavimais. Tačiau, nuolat prastėjanti automobilių kelių tinklo būklė rodo, jog tiek naujos tiek ir rekonstruojamos dangos konstrukcijos projektavimo, kelių tiesybos kokybės ir priežiūros bei finansavimo lygmenyse taikoma praktika pasiteisina tik iš dalies.

Vis dažniau pasitaiko atvejų, kai suprojektuotoje ir įrengtoje asfalto dangos konstrukcijoje pasireiškia pažaidos dar iki tarpremontinio periodo pradžios. Lietuvoje asfalto dangos konstrukcijos projektavimas daugeliu atvejų atliekamas taikant empiriniais metodais nustatytas standartizuotas dangos konstrukcijas,

kurios ne visuomet atspindi kelio dangos eksploatacines sąlygas. Asfalto dangos konstrukcijos ilgaamžiškumą ir efektyvią eksploataciją nulemia visa eilė veiksnių: nuo projektinių sprendinių, įrengimo kokybės, eksploatacijos sąlygų iki vykdomos priežiūros. Pirmalaikio dangos konstrukcijos suirimo tikimybės mažinimui kuriami nauji ir tobulinami esami dangos konstrukcijos analizės metodai. Kitose šalyse taikomi specializuoti asfalto dangos konstrukcijos skaičiavimo metodai įvertinantys sluoksnių medžiagų mechanines savybes ir dangos konstrukcijos funkcionavimą. Siekiant ekonomiškai efektyviai plėtoti prižiūrėti Lietuvos kelių tinklą kyla būtinybė šiuos pažangius asfalto dangos konstrukcijos projektavimo metodus pritaikyti įvertinant vietines aplinkos ir apkrovų sąlygas.

Šiame mokslo darbe analizuojami nestandžios (asfalto) dangos konstrukcijos projektavimo, medžiagų savybių nustatymo ir analizės metodai. Tirta galimybė nustatyti asfalto mišinio dinaminį tamprumo modulį pagal mišinio komponentų savybes bei pritaikyti nustatytas vertes pažangiam dangos konstrukcijos projektavimui ir funkcionavimo prognozavimui.

Darbo aktualumas

Saugos, funkcionalios, patogios, kokybiškos ir ekonomiškios kelių infrastruktūros siekis yra kiekvienos šalies prioritetiniame veiklų sąrašė. Transporto (kelių) infrastuktūros būklė atspindi visos šalies ekonomikos lygį.

Automobilių kelių tinklo dangos konstrukcijos sudarytos iš įvairių kelių tiesybos medžiagų, sluoksnių storių. Lietuvoje išskirtinai taikoma nestandė asfalto dangos konstrukcija dėl gerai žinomos technologijos, greito įrengimo ir nesudėtingos priežiūros. Asfalto dangos konstrukcijos taikomos motorizuoto (automobilių, motociklų) ir nemotorizuoto (dviračių ir pėsčiųjų) transporto eismo zonoje, oro bei vandens transporto antžeminėje infrastruktūroje, bei specialios paskirties aikštelėse (krovinių perkrovimo ir sandėliavimo aikštelėse, peronuose, terminaluose). Asfalto dangos konstrukcijos projektavimas, įrengimas ir eksploatacija tiesiogiai susieti su visomis susisiekimo transporto rūšimis.

Lietuvoje nestandžios (asfalto) dangos konstrukcijos daugeliu atvejų projektuojamos taikant standartizuotas dangų konstrukcijų metodikas („Automobilių kelių standartizuotų dangų konstrukcijų projektavimo taisyklėmis“ KPT SDK 07), kurios sudarytos remiantis istoriniais empirinių stebėjimų duomenimis ir patirtimi. Pasitaiko atvejų, kai standartizuotų dangų konstrukcijų ir medžiagų taikymas tampa neefektyvus, t. y. rekonstruota ar naujai paklotos dangos būklė blogėja greičiau nei buvo suprojektuota. Tai itin aktualu tuose ruožuose, kur netinkamai įvertinta projektinė apkrova (esant perkrautų transporto priemonių eismui, automobilių greitėjimo, lėtėjimo bei stovėjimo zonose). Dangos konstrukcija veikiama besikeičiančio klimato, itin aukštų ir žemų temperatūrų

ekstremumų, jų didėjančio periodiškumo ir trukmės, kurie sąlygoja pakitusią dangos eksploataciją, nei buvo nustatyta empirinių stebėjimų metu. Taigi, automobilių kelių dangos ir jų konstrukcijos eksploatuojamos sunkiai prognozuojamomis apkrovų ir temperatūrų sąlygomis. Todėl dangos konstrukcijos projektavimo metodai ir empiriniai modeliai turi būti periodiškai atnaujinami bei patikslinami atsižvelgiant į besikeičiančias sąlygas.

Užsienio šalyse dangos konstrukcijos projektuojamos įvertinant sluoksnių medžiagų mechanines savybes bei nustatant konstrukcijos reakciją į transporto srauto apkrovas prie galimų temperatūros sąlygų bei prognozuojant dangos funkcionavimą eksploatacijos laikotarpiu. Šis pažangus dangos konstrukcijos projektavimas gali būti taikomas nestandartizuotų naujų medžiagų panaudojimo vertinimui kelių tiesyboje, jei žinomos šių medžiagų mechaninės savybės. Asfalto sluoksnių tampa klampios savybės keičiasi priklausomai nuo temperatūros ir apkrovų poveikio bei sąlygoja visos dangos konstrukcijos funkcionavimą. Nustatius asfalto mišinių tampa ir tampa klampias savybes eksploatacinėse sąlygose galima prognozuoti dangos konstrukcijos funkcionavimą. Tokiu būdu analizuojant projektuojamos dangos konstrukcijos reakciją į apkrovas galima tikslinti dangos konstrukcijos sluoksnių storius kol bus tenkinamos šios atsparumo nuovargiui ir liekamosios deformacijos funkcionavimo sąlygos. Tai leis projektuoti nestandartizuotas dangos konstrukcijas bei analitiškai įvertinti naujų medžiagų ir mišinių panaudojimą. Dangos konstrukcijos sluoksnių storių optimizavimas bei objekte įrengtų sluoksnių medžiagų faktinių mechaninių savybių nustatymas leis efektyviau kontroliuoti ir panaudoti kelių infrastruktūros plėtos ir priežiūros lėšas.

Tyrimų objektas

Naujų, sendintų ir paimtų iš eksploatuojamos dangos asfalto viršutinio, apatinio bei pagrindo sluoksnių dinaminio tamprumo modulio, nustatyto įvertinant mišinio sudėtį ir bitumo dinaminį šlyties modulį, taikymas nestandžios dangos konstrukcijos projektavimui ir funkcionavimo prognozavimui.

Darbo tikslas

Patikslinti nestandžios dangos konstrukcijų projektavimą sukuriant asfalto tampa klampių savybių poveikio dangos konstrukcijos funkcionavimui įvertinimo modelį.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti keliama uždaviniai:

1. Atrinkti, išanalizuoti ir susisteminti mokslinių tyrimų rezultatus, susijusius su asfalto dangos konstrukcijos reakcijos į apkrovą modelia-vimu, asfalto mišinių tampriai klampių bei nesurištų sluoksnių tampr-rių savybių nustatymu ir dangos konstrukcijos funkcionavimo prognozavimu.
2. Ištirti naujus, sendintus ir iš eksploatuojamo kelio dangos paimtus as-
falto mišinius bei nustatyti fizikines ir mechanines savybes. Nustatyti
dinaminį tamprumo ir šlyties modulius asfalto mišiniams ir bitu-
mams, bei taikant suprepozicijos principą sudaryti kompleksines
kreives.
3. Apskaičiuoti asfalto mišinių dinaminį tamprumo modulį taikant bi-
tumo dinaminį šlyties modulį ir mišinio sudėties duomenis. Pritaikyti
Hirsch modelį asfalto mišinių dinaminio tamprumo modulio ir jo
kompleksinės kreivės sudarymui.
4. Nustatyti tamprias ir tampriai klampias savybes apibrėžiančių mode-
lių pritaikymo parametrus asfalto dangos konstrukcijos reakcijos į
apkrovą skaičiavimams.
5. Apskaičiuoti naujų ir sendintų asfalto sluoksnių tampriai klampių sa-
vybių poveikį dangos konstrukcijos reakcijai ir funkcionavimui, kai
tamprios asfalto mišinio savybės vertinamos temperatūriniuose rė-
žiuose ir vidutinėje temperatūroje.
6. Apskaičiuoti bei įvertinti skirtingais metodais projektuojamų asfalto
dangos konstrukcijų ekonominį efektyvumą.
7. Pateikti rekomendacijas asfalto mišinių tampriai klampioms savy-
bėms nustatyti, duomenų analizei bei nestandžios dangos konstrukci-
jų projektavimui.

Tyrimų metodika

Siekiant įgyvendinti disertacijos tikslą ir uždavinius buvo pritaikyti: eksperimen-
tiniai – bitumo ir asfalto mišinių fizikinių (adatos penetracijos, minkštėjimo
temperatūros, mišinio granulimetrinės sudėties, tankio, oro tuštymių ir bitumo
kiekio) ir mechaninių (tiesiškai tampriai klampių ribų, dinaminio šlyties modulio
su DSR ir dinaminio tamprumo modulio su IDT) savybių tyrimų metodai; statis-

tiniai – nustatytų paklaidų normalumo, Fišerio, Studento ir Kolmogorov-Smirnov bandymo metodai; ir skaitiniai – daugiasluoksniškumo teorijos su tampriųjų ir tamptariai klampiųjų medžiagų savybių įvertinimu metodai.

Sąsajai tarp bitumo ir asfalto mišinio mechaninių savybių apibrėžti taikytas Hirsch modelis. Taikant Gordon-Shaw metodą sudarytos bitumo ir asfalto mišinių dinaminio šlyties ir tamprumo modulio kompleksinės kreivės. Dangos konstrukcijos reakcijos į apkrovą skaičiavimai atlikti taikant daugiasluoksniškumo teoriją. Dinaminio tamprumo modulio kitimas priklausomai nuo laiko ir temperatūros įvertintas Huet-Sayegh modeliu.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją pasiekti šie statybos inžinerijos mokslui reikšmingi rezultatai:

1. Sukurtas teorinis modelis, įvertinantis asfalto sluoksnių tamprių klampių savybių įtaką asfalto dangos konstrukcijos funkcionavimui.
2. Sukurtos trys nestandartizuotos eksperimentinių tyrimų procedūros:
 - a) bituminio rišiklio tiesiškai tamptariai klampaus būvio (LVE) nustatymo bandymas su dinaminio šlyties reometru (DSR);
 - b) asfalto mišinių LVE nustatymo bandymai;
 - c) dinaminio tamprumo modulio prie skirtingų apkrovos dažnių nustatymo bandymai netiesioginiu tempimo metodu (IDT).
3. Nacionaliniame lygmenyje pirmą kartą atlikti asfalto mišinių IDT bandymai dinaminio tamprumo modulio kompleksinei kreivei sudaryti.
4. Patobulintas asfalto mišinio dinaminio tamprumo modulio prognozavimo Hirsch modelis, įvertinantis mišinio sudėtį ir bituminio rišiklio dinaminio šlyties modulio kompleksinę kreivę.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Sukurtas nestandžios dangos konstrukcijos funkcionavimo modelis įvertinantis asfalto tamptariai klampias savybes gali būti taikomas dangos konstrukcijų sluoksniams optimizuoti. Dangos konstrukcijos projektavimas atsižvelgiant į tamptariai klampias asfalto savybes ir dangos konstrukcijos funkcionavimą (t. y. atsparumą nuovargiui ir liekamosioms deformacijoms) užtikrino 8 % mažesnes išlaidas kelių tiesybos medžiagai ir įrengimui lyginant su standartiniu projektavimu.

Disertacijos tyrime panaudotas bei patikslintas Hirsch modelis leidžia nustatyti asfalto mišinių SMA 11 S, AC 16 AS, AC 22 PS ir AC 32 PS dinaminį

tampromo modulį vertinant mišinio sudedamąsias dalis ir jų savybes. Pagrindinis nežinomas Hirsch modelyje yra bitumo šlyties modulis, kuris nustatomas prie skirtingų dažnių su DSR. Bitumo mechaninių savybių tyrimai su DSR yra ekonomiškesni ir greitesni lyginant su atitinkamais asfalto mišinių bandymais. Patobulintas Hirsch modelis gali būti taikomas tiek naujų asfalto mišinių tiek ir eksploatuojamo kelio paimtų asfalto sluoksnių mechaninių (tampriai klampių) savybių apibrėžimui bei dangos konstrukcijos reakcijos ir funkcionavimo vertinimui.

Ginamieji teiginiai

1. Projektuojant nestandžias dangos konstrukcijas būtina įvertinti asfalto sluoksnių tampriai klampias savybes ir konstrukcijos funkcionavimą (t. y. atsparumą nuovargiui ir laikomosioms deformacijoms) eksploatacijos laikotarpiu.
2. Dinaminis tampromo modulis apibūdina apkrovos dažnio, laiko bei temperatūros kitimo poveikį asfalto sluoksnių elgsenai nestandžioje dangos konstrukcijoje.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema paskelbta 8 mokslinių straipsnių recenzuojamose mokslo žurnaluose, iš kurių 3 įtraukti į *ISI Web of Science* duomenų bazę.

Dalis analitinio tyrimo pritaikyta Europos Sąjungos struktūrinės paramos 2007–2013 m. Žmogiškųjų išteklių plėtros veiksmų programos finansuotame projekte „Taškinėms statinėms ir dinaminėms apkrovoms atsparios susisiekimo komunikacijų dangos konstrukcijos pritaikytos besikeičiančio klimato sąlygoms, modelis“ ir Lietuvos automobilių kelių direkcijos prie Susisiekimo ministerijos mokslo darbe „Automobilių kelių dangų konstrukcijų skaičiavimo diegimas“.

Dangos konstrukcijos skaičiavimo modelio koncepcija pristatyta dvejuose darbo seminaruose Latvijoje ir Estijoje. Disertacijos tema atliktų tyrimų rezultatai paskelbti keturiose mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

Tarptautinėje konferencijoje „*CETRA 2014: The 3rd international conference on road and rail infrastructures*“, 2014 m., Splitas;

Tarptautinėje konferencijoje „*The 9th International Conference „Environmental Engineering*“, 2014 m., Vilnius;

Tarptautinėje konferencijoje „*International conference on Applied Mechanics and Mechatronics Engineering (AMME 2015)*“, 2015 m., Bangkogas;

Tarptautinėje konferencijoje „*The 6th European Transport Research Conference MOVING FORWARD: Innovative Solutions for Tomorrow's Mobility*“, 2016 m., Varšuva.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, literatūros šaltinių bei mokslinių publikacijų paskelbtų disertacijos tema sąrašai, santrauka anglų kalba. Disertacijos rengimo algoritmas pateiktas 1 paveiksle. Darbo apimtis su santrauka – 159 puslapiai (be priedų). Tekste panaudotos 59 numeruotos formulės, 62 paveikslai ir 21 lentelė. Rašant disertaciją apžvelgti 239 literatūros šaltiniai.

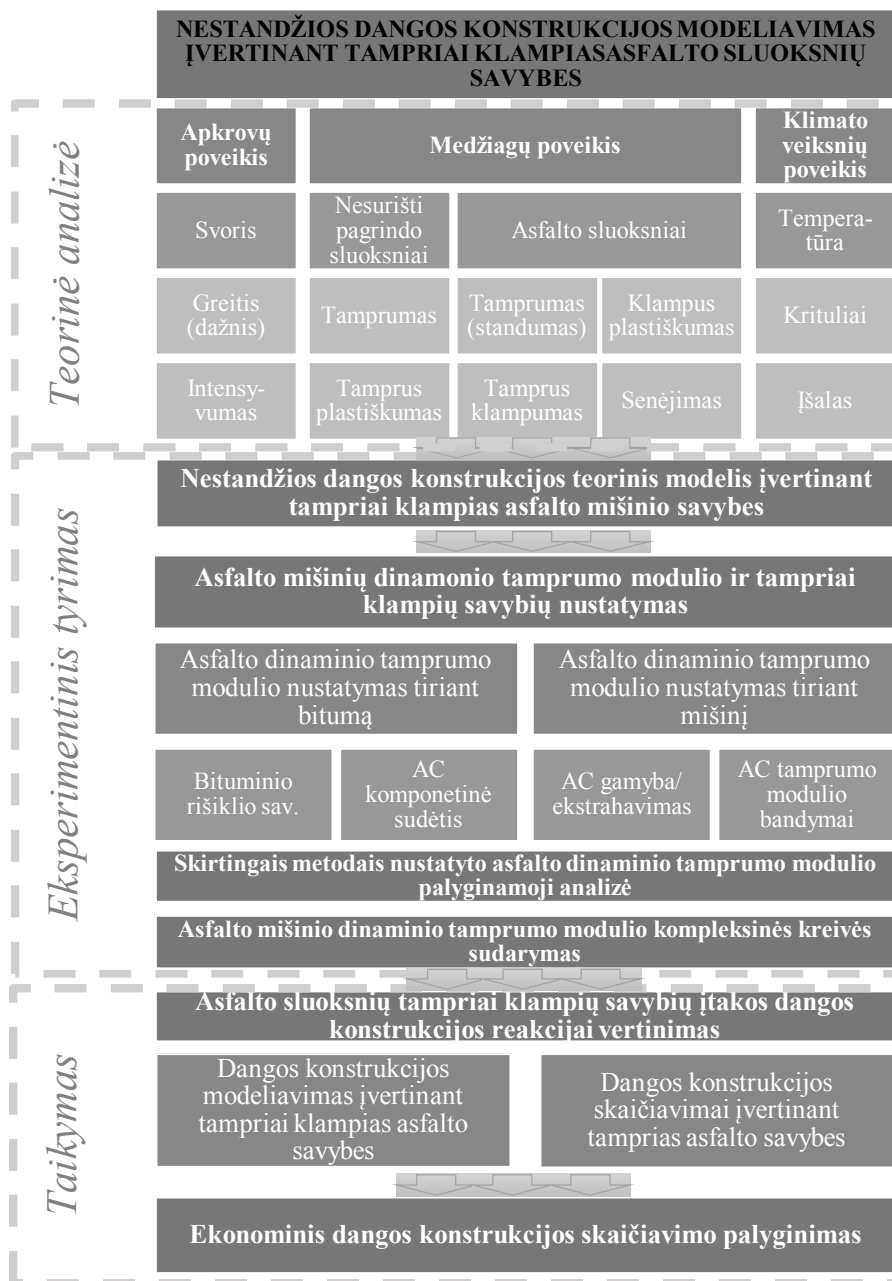
Padėka

Disertacijos autorė pirmiausia dėkoja moksliniam vadovui doc. dr. Audriui Vaitkui už kantrybę ir atkaklų vadovavimą, vertingas mokslines konsultacijas ir patarimus, visokeriopą pagalbą, bei už suteiktas tobulėjimo galimybes mokslinėje ir darbinėje aplinkoje. Taip pat dėkoja moksliniam vadovui prof. dr. Donatui Čygui už mokslines išvalgas, geranoriškumą ir paramą disertacijos rengimo metu.

Autorė dėkinga prof. dr. Adam Zofka už neįkainojamą mokslinę patirtį, žinias bei kritišką požiūrį, įgytą stažučių Varšuvos kelių ir tiltų tyrimo institute (Varšuva, Lenkija) metu. Bei reiškia padėką disertacijos ekspertams doc. dr. Dariui Bačinsui ir doc. dr. Sauliui Vaitkui už taiklias pastabas ir komentarus, kantrybę ir supratingumą.

Už visokeriopą palaikymą doktorantūros studijų metu autorė dėkinga VGTU Kelių tyrimo instituto ir Kelių katedros kolegoms, o Lietuvos mokslo tarybai – už skirtą finansinę paramą.

Ne mažiau dėkinga savo tėvams už auklėjimą, rūpestį ir rodytą pavyzdį bei broliams už smagiai praskriejusią vaikystę. Nuoširdžiai dėkinga savo gyvenimo draugui ir partneriui Andriui Kleizai už paramą, palaikymą, šilumą ir šypsenas sunkiausiais momentais.



1 pav. Disertacijos rengimo algoritmas
Fig. 1. The arrangement algorithm of dissertation

Asfalto dangos konstrukcijos modeliavimo ir funkcionavimo metodų analizė

Automobilių kelių dangos konstravimas – tai kelio struktūros projektavimas analizuojant transporto srauto apkrovas, medžiagų savybes, aplinkos sąlygas bei jų poveikį dangos konstrukcijos mechaniniam funkcionavimui. Pagrindinis automobilių kelių dangų konstravimo tikslas – nustatyti ekonomiškai efektyviausią dangos konstrukciją, kurioje eksploatacijos metu nesusidarys struktūrinių pažeidimų: kritinių nuovargio plyšių ir liekamųjų deformacijų. Automobilių kelių dangos konstrukcijos skaičiavimas ir projektavimas tobulėja palaipsniui kartu su statybos ir technologijų raida. Pirmajame skyriuje pateikiami automobilių kelių dangų konstravimo principai, konstravimo metodų ir jų raidos apžvalga. Apžvelgiami dangos konstrukcijos funkcionavimą lemiantys veiksniai, medžiagų fizikinės ir mechaninės savybės, bitumo ir asfalto tampriai klampiomis savybių samprata, jų nustatymo bei duomenų interpretavimo metodai. Šiame skyriuje taip pat pateikti Lietuvoje ir užsienio šalyse taikomų asfalto dangos konstrukcijų skaičiavimo metodai. Aprašytas dangos konstrukcijos modelis ir įvesties duomenų poreikis.

Skyriaus tematika paskelbti straipsniai: Vaitkus *et al.* (2014a), Vaitkus *et al.* (2014b), Vaitkus *et al.* (2014c), Kleizienė *et al.* (2015).

1.1. Automobilių kelių dangų konstravimo metodai

Automobilių kelių dangos konstrukcijos projektavimas – tai inžineriniais argumentais paremtas sprendimų priėmimo procesas, įvertinantis įvairius kintamuosius ir faktorius, pradedant nuo dangos konstrukcijos medžiagų rūšies ir konstravimo metodo pasirinkimo ir baigiant dangos funkcionavimo prognozavimo metodų taikymu. Taigi, norint pagrįsti priimtų dangos konstrukcijos sprendimų tinkamumą argumentuojama atsižvelgiant į inžinerinius ir kitus dangų konstravimo principus. Išskiriami šeši pagrindiniai inžineriniai dangų konstravimo principai (Thom 2008; FGSV 498 2009):

- *Dangos konstrukcijos stiprumas ir žemės sankasos apsauga.* Dangos konstrukcija turi būti pakankamo storio ir tamprumo bei užtikrinanti, jog konstrukcijoje nesusidarys ribinių deformacijų ir įtempimų, sukeliančių struktūrinių pažaidų susidarymą.
- *Dangos konstrukcijos sluoksnių atsparumas liekamosioms deformacijoms susidaryti.* Kiekvienas dangos konstrukcijos sluoksnis turi būti pakankamo tamprumo ir patvarumo užtikrinančio, kad sluoksnis nebus deformuotas esant faktinėms apkrovoms.
- *Dangos konstrukcijos sluoksnių atsparumas nuovargio plyšių susidarymui.* Turi būti užtikrintas bituminiais ar hidrauliniais rišikliais surišų pagrindo sluoksnių stiprumas.
- *Dangos konstrukcijos sluoksnių atsparumas aplinkos poveikiui.* Dangos konstrukcija turi būti pakankamo šalčiui atsparaus storio, užtikrintas drenažas ir paviršinio vandens nuleidimas. Taip pat dangos sluoksnių medžiagos turi būti kiek įmanoma atsparesnės aplinkos temperatūros pokyčiams.
- *Saugių ir patogių dangos paviršiaus charakteristikų užtikrinimas.*
- *Nesudėtingo įrengimo ir priežiūros darbų parinkimas.* Dangos konstrukcijos priežiūra turi būti nesudėtinga ir nebrangi.
- *Projektuojami dangos konstrukcijos sluoksnių storiai turi būti ne plonesni, nei leidžia įrengimo technologija.*

Kiti dangų konstravimo principai apima ekonominius (naudos ir kaštų analizė) ir aplinkosaugos (sunaudojamos energijos, išskiriamo anglies dvideginio, gruntinio vandens užterštumo, triukšmo ir pan.) aspektus, vertinamus visam konstrukcijos naudojimo laikotarpiui. Ekonominis dangos konstrukcijos efektyvumas įvertinamas minimizuojant visas išlaidas, susijusias su dangos konstrukcijos įrengimu (t. y. medžiagų sąnaudų, klojimo darbų išlaidos), eksploatacija (t. y. priežiūros, taisymo išlaidos ir likutinė vertė) bei kelių naudotojų nuostoliais (t. y. eismo trukdžiai, nelaimingi atsitikimai, transporto priemonių dėvėjimasis, degalų sąnaudos ir pan.) (Read et al. 2003; Thom 2008). Dangos konstrukcijos sluoksnių storiai ir medžiagos turi būti suprojektuotos taip, kad dangos konst-

rukcijos degradacijos procesai turėtų kuo mažesnę poveikį kelių naudotojams su mažiausiomis išlaidomis dangos eksploatacijai (Amini *et al.* 2012).

Kelio danga tiesiogiai perima transporto sukeltas apkrovas bei nulemia važiavimo kokybę, saugumą, padangų sukibimą su danga, triukšmo generavimą (Vaitkus *et al.* 2014). Kadangi daugeliu atvejų dangos konstrukcijų projektavimas yra balansavimas tarp saugumo, tvirtumo, išlaidų, estetikos, priežiūros ir važiavimo kokybės, todėl projektuojant svarbu atsižvelgti į kelio paskirtį ir reikalavimus bei kelių tinklo plėtros strateginius planus (Frangopol *et al.* 2007; Thom 2008). Kelio dangos konstrukcijos rodiklių prioritetai pateikti 1.1 lentelėje. Magistraliniuose keliuose svarbu užtikrinti puikią važiavimo kokybę, lygumą, saugumą, atsparumą slydimui, triukšmo emisijos slopinimą, nedidelį priežiūros ir remonto darbų poreikį. Miestų ir gyvenviečių teritorijose prioritetas teikiamas paprasto ir greito įrengimo bei remonto dangoms, turinčioms aukštą atsparumą slydimui ir provėžoms.

Dangos konstrukcijos projektavimas – tai optimalios dangos konstrukcijos sluoksnių storių nustatymas priartėjimo būdu. Dangos konstrukcijų projektavimo metodai dažniausiai sudaryti iš trijų pagrindinių dalių (Yoder *et al.* 1975):

- *Projektinių sąlygų apibrėžimas.* Aplinkos, apkrovų ir medžiagų savybių nustatymas bei bandymo metodų parinkimas;
- *Reakcijos modelio sudarymas ir parametrų nustatymas.* Transporto priemonių apkrovų, sukeltų įtempimų ir deformacijų skaičiavimo metodo (skaitinio modelio) pasirinkimas (1.3 skyrelyje);
- *Funkcionavimo įvertinimas ir prognozavimas.* Projektinės apkrovos (arba įtempimai) negali būti didesni nei ribinės apkrovos (arba įtempimai) atsižvelgiant į dangos konstrukcijos nuovargio ir liekamųjų deformacijų sąlygas visu eksploatacijos metu.

Mechaniniame empiriniame dangos konstrukcijos projektavimo gide (MEPDG) atskirai išskirtas naujos ir rekonstruojamos dangos konstrukcijos projektavimas (NCHRP 1-37A 2004a). Dangos konstrukcijos procesas taip pat skiriasi priklausomai nuo dangos konstrukcijos tipo. Nestandžios dangos konstrukcijos projektavimas sudarytas iš:

1. Įvesties duomenų surinkimo bandomosios dangos konstrukcijos sudarymui – nustatomos žemės sankasos grunto, nesurištų ir surištų pagrindo sluoksnių bei asfalto mišinių savybės, transporto priemonių apkrovos ir aplinkos sąlygos bei projektavimo ir įrengimo kokybės koeficientai.
2. Funkcionavimo kriterijų nustatymo priimtinais dangos konstrukcijos būklei projektinio laikotarpio pabaigoje (pvz. nelygumo lygis, nuovargio plyšių mastas, provėžų gylis, temperatūrinių plyšių dažnis).
3. Prognozuojamo priimtino dangos konstrukcijos funkcionavimo prognozavimo patikimumo lygio parinkimo.

1.1 lentelė. Dangos konstrukcijos rodiklių prioritetai**Table 1.1.** The priority index of road pavement design

Dangos konstrukcijos eksploatacijos paskirtis	Poreikiai ir prioritetai
Užmiesčio magistraliniai keliai	Saugumas, atsparus slydimui dangos paviršius Puiki važiavimo kokybė Tylus dangos paviršius Mažas priežiūros poreikis
Miesto gatvės	Lengvas įrengimas Atsparus slydimui dangos paviršius Atsparumas plastinėms deformacijoms Mažas priežiūros poreikis
Užmiesčio krašto keliai	Gera (pakankamai gera) važiavimo kokybė Atsparus slydimui dangos paviršius
Vietinės reikšmės keliai ir gatvės	Ekonomiškas įrengimas Ilgaamžė danga Pritaikytas periodiniam sunkiojo aptarnaujančio transporto eismui
Pėsčiųjų ir dviratininkų takai	Estetiška ir suderinta su architektūriniais sprendimais Pritaikyta (draugiška) žmonėms su specialiais poreikiais
Stovėjimo aikštelės	Pakankama dangos konstrukcijos laikomoji geba esant statinėms apkrovoms Estetiška ir suderinta su architektūriniais sprendimais (miesto teritorijoje)
Krovinių ir konteinerių perkrovimo aikštelės	Ribinė deformacija Pakankama dangos konstrukcijos laikomoji geba
Aerodromo elementai ir peronai	Ribinė deformacija Atspari slydimui danga Atspari irimui danga Atspari agresyvioms cheminėms medžiagoms, degalams ir tepalams danga Mažas priežiūros darbų poreikis Greitas dangos taisymas

4. Transporto apkrovų, medžiagų savybių ir aplinkos sąlygų įvertinimo per dangos konstrukcijos projektinį laikotarpį.
5. Dangos konstrukcijos reakcijos apskaičiavimo nuo kiekvienos ašies tipo ir apkrovos lygio viso projektinio laikotarpio metu taikant daugiasluoksnės tamprios konstrukcijos arba baigtinių elementų metodus.
6. Suminio pažaidų ir/arba suirimo lygio nustatymo kiekvienam dangos konstrukcijos funkcionavimo kriterijui projektinio laikotarpio pabaigoje.

7. Pažaidų susidarymo ir plitimo prognozavimo kiekvieno analizės periodo pabaigoje visame projektiniame laikotarpyje taikant kalibruotus MEPDG funkcionavimo modelius.
8. Dangos konstrukcijos nelygumo (IRI) prognozavimo kaip suminės visų pažaidų funkcijos.
9. Rezultatų įvertinimo pagal tikėtiną bandomosios dangos konstrukcijos funkcionavimą esant nustatytam patikimumo lygiui.

Jeigu projektuojama dangos konstrukcija netenkina funkcionavimo kriterijų, keičiamos konstrukcijos sluoksnių medžiagos ir/ar storiai. Kartojami procedūros 4–9 etapai, kol projektinė dangos konstrukcija tenkina funkcionavimo reikalavimus.

Erlingsson (2012) pristatė mechaninį empirinį dangos konstrukcijos projektavimo metodą, paremtą dangos konstrukcijos funkcionavimo vertinimu remiantis empiriniais duomenimis bei teoriniu reakcijos į apkrovą įvertinimu. Metodo taikymas užtikrina tikslią provėžų formavimosi prognozę ilgiems periodams, kai tuo tarpu paprastesni metodai įgalina prognozuoti tik 8–9 metų laikotarpiui. Tyrimo metu nustatyta, kad Korkiala-Tanttu (2008) pagrindo sluoksnių liekamųjų deformacijų įvertinimo modelis tikslesnis.

Apibendrinant 1.1 skyrelyje pateiktą informaciją galima teigti, kad dangos konstrukcija visu eksploataciniu laikotarpiu turi būti pakankamos laikomosios gebos, atspari šalčio poveikiui ir pasižymėti reikalaujamomis eksploatacinėmis savybėmis. Užsienio šalyse taikomi dangos konstrukcijos projektavimo metodai įvertina sluoksnių medžiagų mechanines savybes, kurie įgalina prognozuoti dangos konstrukcijos funkcionavimą.

1.2. Asfalto dangos konstrukcijos funkcionavimo bei degradacijos samprata

Asfalto dangos konstrukcija turi būti suprojektuota ir įrengta taip, kad užtikrintų saugias ir patogias eismo sąlygas visu numatytu eksploataciniu laikotarpiu. Dangos (konstrukcijos) degradacijos procesai (*angl. Deterioration mechanisms*) – tai procesai, kurie nulemia dangos būklės prastėjimą. COST 333 (1999) tyrimo metu dangos (konstrukcijos) degradacijos procesai suskirstyti į 12 tipų pradedant nuo svarbiausių:

1. Provėžos asfalto sluoksniuose.
2. Plyšiai susidarantys dangos paviršiuje (progresuojantys gilyn).
3. Išilginis nelygumas.
4. Sukibimo praradimas (atsparumo slydimui ir šliaužimui sumažėjimas).
5. Išilginiai plyšiai vėžėje.

6. Plyšiai susidarantys asfalto sluoksnio apačioje (nuovargio plyšiai progresuojantys į viršų).
7. Bendras plyšių dangoje kiekis.
8. Dangos irimas (*angl. Ravelling*);
9. Struktūrinės provėžos (pagrindo sluoksniuose ir žemės sankasoje);
10. Dangos konstrukcijos iškilnojimas (dėl šalčio poveikio; *angl. Frost heave*);
11. Dangos nudilimas (dėl dygliuotų padangų poveikio; *angl. Studded tyres*);
12. Temperatūriniai plyšiai (dėl žemos temperatūros).

Dangos konstrukcijos funkcionavimas vertinamas per degradacijos modelius (*angl. Deterioration models*). Degradacijos modeliai – tai matematinės funkcijos, naudojamos analitiniuose dangų valdymo sistemoje (DVS), kur kintamieji yra: kelio dangos konstrukcija, jos techninės ir eksploatacinės charakteristikos, amžius, taikomi priežiūros ir remontų standartai, automobilių eismo intensyvumas, automobilių apkrovos į dangą, kelio geometriniai parametrai, klimato sąlygos ir kita – išreikštos fizikiniais dydžiais arba faktoriais (Braga 2005).

Pažangiuose asfalto dangos konstrukcijos projektavimo metoduose priimta, kad stiprioje (arba pakankamos laikomosios gebos) dangos konstrukcijoje eksploatacijos metu gali pasireikšti tik tampriosios deformacijos (Button et al. 2001). Kitais žodžiais tariant, dangos konstrukcijos sluoksnių medžiagos turi nesuirti nepriklausomai nuo aplinkos sąlygų bei transporto priemonių sukeltos apkrovos numatytame projektiniame laikotarpyje. Dangos konstrukcijos projektavimo metu vertinami tik tie degradacijos modeliai, kurie yra susiję su struktūrinių pažeidimų susidarymu dėl nepakankamos konstrukcijos laikomosios gebos (FGSV 498 2009). Suirimas dangos konstrukcijos funkcionavimo požiūriu – tai kritinių struktūrinių pažeidimų, tokių kaip nuovargio plyšiai ir/arba struktūrinės liekamosios deformacijos (provėžos), susidarymas.

1.2.1. Dangos konstrukcijos funkcionavimo prognozavimas ir vertinimas

Dangos konstrukcijos funkcionavimo prognozavimas – tai suprojektuotos dangos konstrukcijos apskaičiuotų įtempimų ir deformacijų nuo apkrovos įvedimas į modelius (1.2.2, 1.2.3, 1.2.4 poskyrius), pagal kuriuos nustatomas orientacinis apkrovos operacijų skaičius iki dangos konstrukcijos suirimo. Dangos konstrukcijos funkcionuos tinkamai (t. y. per projektinį laikotarpį nesusidarys struktūrinės pažeidos) jeigu visais atvejais projektinė apkrova nebus didesnė už ribinę apkrovą (FGSV 498, 2009).

Funkcionavimo modeliai ir jų koeficientai nustatyti atlikus medžiagų mechaninius ardančiuosius bandymus bei patikslinti prie konkrečių eksploatacijos sąlygų. Mechaninių ardančių bandymų metu nustatomi sluoksnių ribiniai (suirimo) įtempiai arba deformacijos. Prognozuojant dangos konstrukcijas funkcionavimą šie modeliai taikomi didžiausių leistinųjų įtempių arba apkrovų ciklų skaičiui nustatyti. Manoma, kad, jeigu eksploatacijos metu projektinės apkrovos viršys ribines, dangoje susidarys pažaidų. Ribiniai įtempiai ir deformacijos bei ribinis apkrovų skaičius nustatomi atsižvelgiant į (Hogentogler *et al.* 1929; Rowe *et al.* 2000; Di Benedetto *et al.* 1996; Lundstrom *et al.* 2007; Christensen *et al.* 2012):

- nuovargio plyšių susidarymą asfalto sluoksnių apačioje;
- nuovargio plyšių susidarymą hidrauliškai surišto pagrindo sluoksnio apačioje;
- liekamųjų deformacijų susidarymą nesurįštų pagrindo sluoksnių ir žemės sankasos viršuje.

Dangos konstrukcijos funkcionavimo vertinimo eiga: 1) suprojektuojama dangos konstrukcija su dangos, pagrindo bei apsauginiu šalčiui atspariu sluoksniais; 2) parenkamos dangos konstrukcijos medžiagos, nustatomos arba priimančios teorinės medžiagų mechaninės charakteristikos; 3) apskaičiuojami įtempiai ir deformacijos kritiniuose dangos konstrukcijos taškuose nuo projektinės apkrovos; 4) nustatomos ribinės (leistinosios) apkrovos suprojektuotai dangos konstrukcijai taikant funkcionavimo modelius; 5) tikrinamas bendras projektinės ir ribinės apkrovos santykis.

Suprojektuotos dangos konstrukcijos laikomoji geba tikrinama taikant Minerio hipotezę, t. y. projektinės apkrovos ir ribinės apkrovos intensyvumo santykių suma neviršyti – 1. Sąlyga tikrinama kiekvienam sluoksniui atskirai prie skirtingų temperatūrų ir rato apkrovų dydžių. Minerio hipotezės sąlyga pagal (FGSV 498 2009; Hopman *et al.* 1989):

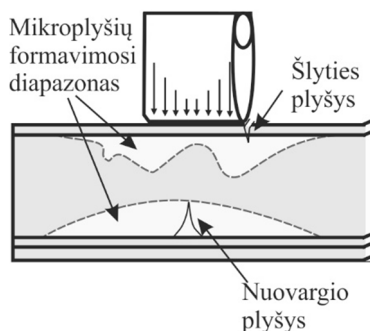
$$\sum_{Minerio} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k \frac{N_{i-j}^{pr}}{N_{i-j}^{rib}} \leq 1, \quad (1.1)$$

čia N_{pr} – projektinis i -osios apkrovos klasės intensyvumas (operacijų skaičius) esant j -ajam temperatūrų intervalui (1.4.2 poskyrį ir 1.53 formulę); N_{rib} – ribinis i -osios apkrovos klasės intensyvumas (operacijų skaičius) esant j -ajam temperatūrų intervalui (1.2.2, 1.2.3, 1.2.4 poskyrius); m – apkrovos klasės ($m = 2 \text{ t}, 4 \text{ t}, 6 \text{ t}, \dots i$); k – temperatūros intervalai ($k = -17,5^\circ\text{C}, -12,5^\circ\text{C}, -7,5^\circ\text{C} \dots j$).

Teigiama, kad dangos konstrukcijos funkcionavimas užtikrintas, jei per projektinį laikotarpį dangos konstrukcijoje nesusidarys ribinių įtempių ir deformacijų arba nebus pasiektas ribinis bendras apkrovų operacijų skaičius (Yoder *et al.* 1975; Huang 2004; Thom 2008).

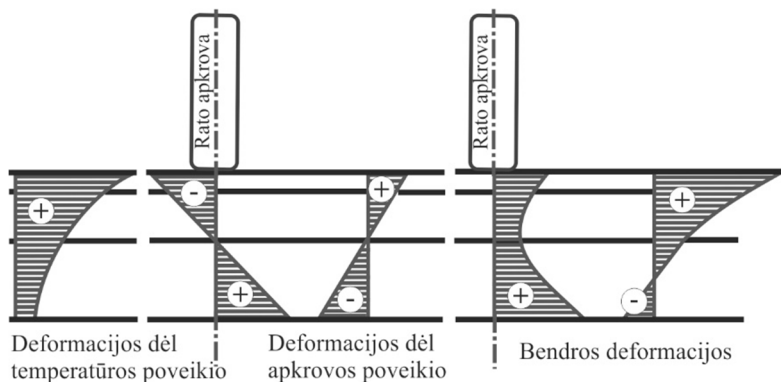
1.2.2. Asfalto sluoksnių atsparumo nuovargiui vertinimas

Asfalto dangos plyšiai pradeda formotis viršutiniuose ir apatiniuose dangos sluoksniuose (1.1 pav.). Tačiau šie plyšiai dangoje formuojasi dėl skirtingų priežasčių (1.2 pav.). Dangos konstrukcijos nuovargis formuojasi asfalto pagrindo sluoksnio apačioje, kur transporto apkrovos sukelia didžiausias tempimo deformacijas.



1.1 pav. Mikroplyšio formavimasis ir progresavimas nuo transporto sukelių apkrovų (Dore et al. 2009)

Fig. 1.1. Microcracks and propagating cracks under traffic loading (Dore et al. 2009)



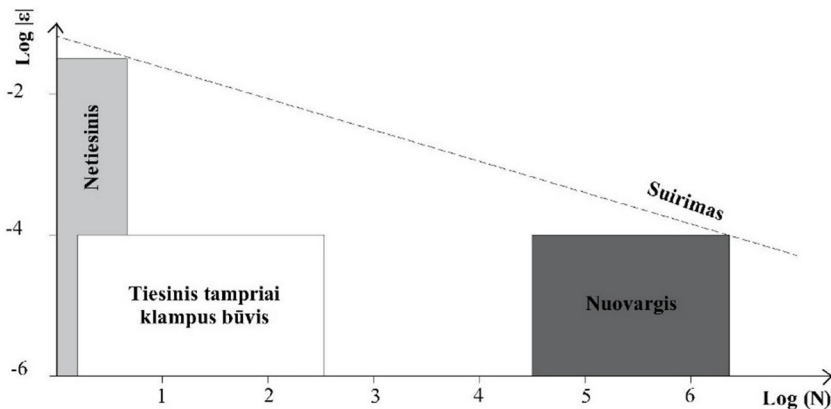
1.2 pav. Reakcijos (deformacijų ir įtempių) pasiskirstymas nuo rato apkrovos asfalto dangos sluoksniuose (Schindler 2008)

Fig. 1.2. The response (stress and strain) of asphalt pavement layers under wheel load (Schindler 2008)

Tempimo deformacijos amplitudė nulemia dangos konstrukcijos eksploatacijos laiką, t. y. nuo deformacijų masto priklauso ribinis apkrovos ciklų skaičius.

Nuovargio plyšio formavimasis asfalto sluoksnyje plinta palaipsniui (Ewalds et al. 1986): priminio mikroplyšio susidarymas; plyšio progresavimas, stabilaus mikroplyšio didėjimas į makroplyšį; plyšio susidarymas – medžiagos suirimas pradėjus plyšiui didėti nestabiliai (netvariai).

Teorinė asfalto mišinių elgsenos priklausomybė nuo deformacijų ir apkrovos ciklų skaičiaus pateikta 1.3 paveiksle. Jame matoma, kad esant mažoms deformacijoms po tam tikro apkrovų skaičiaus sluoksnyje susidaro nuovargio plyšių. Medžiagų nuovargio bandymai atliekami suteikiant bandiniui pastovias deformacijas arba įtempius tiesiškai tamptariai klampiam būvyje. Teigiama, kad asfalto sluoksnyje susidaro nuovargio požymių, kai dinaminis tamprumo modulis sumažėja per pusę (Dijk et al. 1977; Lundstrom et al. 2007; Mollenhauer et al. 2012). Rowe et al. (2000) rekomendavo nuovargio bandymų metu duomenis surinkti vienodais laiko/ciklų tarpais. Taip pat rekomendavo nestabdyti bandymo sumažėjus tamprumo moduliui 50 %, o tęsti tol kol dinaminis tamprumo modulis sumažės 80 % nuo pradinės vertės.



1.3 pav. Asfalto mišinių elgsenos priklausomybė nuo deformacijų ir apkrovos ciklų skaičiaus (Di Benedetto et al. 2004)

Fig. 1.3. The strain and load cycle influence to asphalt mixtures behavior (Di Benedetto et al. 2004)

Santykis tarp apkrovos ciklų ir įtempių ir deformacijų lygio nuovargio įvertinimui apibrėžiamas Wöhler kreivė (1.2 ir 1.3 formules).

$$\varepsilon \text{ arba } \sigma = A \cdot N_f^{-b}, \quad (1.2)$$

$$N_f = k_1 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)^{k_2}, \quad (1.3)$$

čia N_f – apkrovos ciklo pasireiškus nuovargiui; A, b, k_1, k_2 – konstantos; ε arba σ – deformacijos arba įtempiai, priklausomai nuo nuovargio bandymo pobūdžio, kai kontroliuojama atitinkamai deformacijos arba įtempimai.

Atsižvelgiant į asfalto sluoksnių atsparumo nuovargiui sąlygą, i -osios apkrovos ribinis operacijų skaičius esant j -ajai temperatūrai N_{rib} apskaičiuojamas pagal formulę (FGSV 498 2009):

$$N_{i-j}^{rib} = \frac{SF}{F} a \cdot \varepsilon_{y,i-j}^k, \quad (1.4)$$

čia SF – poslinkio koeficientas, taikomas IDT bandymo metodu nustatytiems nuovargio rezultatams; F – saugos koeficientas: $F = 2,1$ – kai numatyta asfalto sluoksnius įrengti ant apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio (smėlio); $F = 1,1$ – kai numatyta asfalto sluoksnius įrengti ant pagerinto apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio; $F = 0,6$ – kai numatyta asfalto sluoksnius įrengti ant žvyro/skaldos/hidrauliškai surišto pagrindo sluoksnio;

a, k – koeficientai apibūdinantys medžiagos nuovargio funkciją, nustatytos nuovargio bandymo metu; $\varepsilon_{y,i-j}$ – horizontaliosios deformacijos asfalto sluoksnio apačioje veikiant i -ai apkrovai ir esant j -ajam temperatūrai, ‰.

1.2.3. Asfalto sluoksnių atsparumo plastinėms deformacijoms vertinimas

Dangos konstrukcijos plastinės deformacijos atsižvelgiant į susidarymo priežastis skirstomos į keturias rūšis (Vaitkus *et al.* 2014; Vaitkus *et al.* 2013; Eddhahak-Ouni *et al.* 2012; Fang *et al.* 2004):

- deformacijos/defektai paviršiuje – suirimas dėl ciklinio mechaninio poveikio (nudilimo) arba smūginių apkrovų (įspaudimo);
- viršutinio asfalto sluoksnio deformacijos – suirimas dėl asfalto viršutinio sluoksnio mišinio mažo atsparumo šlyties įtempiams;
- asfalto sluoksnių deformacijos – suirimas dėl asfalto viršutinio ir apatinio sluoksnių mišinių mažo atsparumo šlyties įtempiams;
- dangos konstrukcijos deformacijos – suirimas dėl neužtikrintos visos konstrukcijos laikomosios gebos.

Asfalto sluoksnių plastinių deformacijų prognozavimas ir modeliavimas komplikuoatas, nes vertinamos netiesinės, plastinės asfalto mišinio savybės, kurių analitinis aprašymas yra itin sudėtingas. Todėl dažniausiai asfalto sluoksnių atsparumas plastinėms deformacijos įvertinamas eksperimentiniais bandymais, atliktais esant konkrečioms eksploatacijos apkrovoms prie kritinių aplinkos sąlygų.

1.2.4. Nesurištų pagrindo sluoksnių ir žemės sankasos atsparumo liekamosioms deformacijoms vertinimas

Dangos konstrukcijos laikomoji geba nulemia liekamųjų deformacijų susidarymą nesurištuose pagrindo sluoksniuose ir ypatingai žemės sankasos paviršiuje. Projektuojant dangos konstrukcijas apskaičiuojami įtempiai žemės sankasos paviršiuje ir nustatomas apkrovos operacijų skaičius iki ribinės deformacijos. Nepalankama dangos konstrukcijos laikomoji geba sąlygoja visos struktūros degradaciją, kuri pirmiausia pasireiškia kaip nuovargio plyšiai ir struktūrinės provėžos (Vaitkus *et al.* 2014; Vaitkus *et al.* 2014).

Atsižvelgiant į žemės sankasos arba sluoksnių be rišiklių atsparumo liekamosioms deformacijoms sąlygą i -osios apkrovos ribinis skaičius esant j -ajai temperatūrai N_{rib} apskaičiuojamas pagal formulę 1.5 (FGSV 498 2009):

$$N_{i-j}^{rib} = 10^{\frac{1}{0,7} \left(\frac{0,00875 \cdot E_{V2} - 1}{\sigma_{z,i-j}^{pr} \cdot \gamma} \right)}, \quad (1.5)$$

čia E_{V2} – žemės sankasos arba pagrindo sluoksnių be rišiklių deformacijos modulis, MPa; $\sigma_{z,i-j}^{pr}$ – didžiausi vertikalieji įtempiai pagrindo sluoksnių be rišiklių viršuje veikiant i -ajai apkrovai ir esant j -ajai temperatūrai, MPa; γ – saugos koeficientas (atsižvelgiant į dangos konstrukcijos klasę).

Esant nepalankioms hidrologinėms sąlygoms dangos konstrukcijos laikomosios gebos sumažėjimas gali būti įvertinamas priimant atitinkamai sumažinus žemės sankasos grunto deformacijos modulio E_{V2} vertes.

Apibendrinant 1.2 skyrelį galima teigti, kad dangos konstrukcijos funkcionavimas įvertinamas pagal dangos konstrukcijos sluoksnių medžiagų mechanines savybes, nustatytas eksperimentiškai atliekant ardančiuosius bandymus. Dangos konstrukcija turi užtikrinti, kad dangos sluoksnių reakcija (įtempiai, deformacijos ir įlinkis) į transporto srauto generuojamas apkrovas visais atvejais būtų mažesnė už ribines apkrovas.

1.3. Asfalto dangos konstrukcijos sluoksnių savybių ir modelių vertinimas

Dangos konstrukcijos projektuojamos priartėjimo būdu, priimant orientacinius sluoksnių storius ir juos optimizuojant atsižvelgiant į transporto apkrovas, temperatūros poveikį ir funkcionavimo kriterijus. Šiame poskyryje apžvelgiami dangos konstrukcijos reakcijos (įtempių ir deformacijų) į apkrovą skaičiavimo metodai, medžiagų savybių nustatymo metodai ir taikomi modeliai.

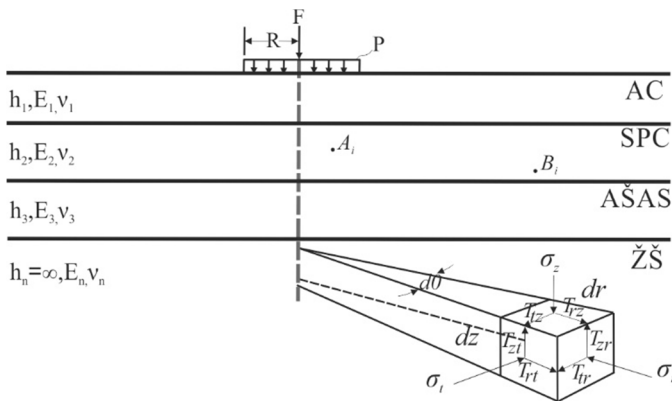
1.3.1. Dangos konstrukcijos reakcijos į apkrovas skaičiavimo samprata

Dangos konstrukcijos reakcija į apkrovas išreiškiama per deformacijas ir įtempius, kurie nustatomi analitiniais modeliais. Medžiagų mechanikoje taikomi du tipiniai skaitiniai modeliai: kontinuumo ir dalelių tarpusavio sąveikos (Rimša 2014: 116). Kelių inžinerijoje taikomi susupaprastinti skaitiniai modeliai, todėl literatūroje išskiriami keturi (BRRC 2000): daugiasluoksnis tamprus metodas (DSTM), ekvivalentinio storio (ESM), baigtinių elementų (BEM) ir diskretinių elementų (DEM) metodais pagrįstus modelius.

Daugiasluoksnis tamprus metodas (DSTM) – tai daugiau nei trijų sluoksnių ant izotropinės puserdvės sistema, kurioje įtempiai ir deformacijos nustatomi pagal Burmister sprendinį. Boussinesq pirmasis išsprendė vertikaliosios apkrovos poveikio izotropinėje puserdvėje uždavinį ir išvedė įtempių, santykinės deformacijos ir įlinkio nustatymo lygtis nepriklausomai nuo analizuojamo taško vietos (Boussinesq 1885). Analitinio daugiasluoksnės konstrukcijos metodo pradininku laikomas Burmister (1943), kuris pritaikęs Boussinesq formules apskaičiavo įtempių ir santykinės deformacijos pasiskirstymą dviejų sluoksnių dangos konstrukcijai (Burmister 1943), o vėliau ir trijų sluoksnių (Burmister 1945). Vėliau tamprumo teorijos pagrindai pritaikyti didesniai dangos konstrukcijos sluoksnių skaičiui (Huang 1967; Huang 1968).

Atsižvelgiant į Yoder ir Witczak (1975) ir FGSV 425 B 1 (2011) DSTM pagrįstas šiomis sąlygomis:

- dangos konstrukcijos sluoksniai yra tolygaus (nekintamo) storio;
- paskutinis sluoksnis yra neriboto (begalinio) storio (*angl. infinity thickness*);
- visi sluoksniai horizontalia kryptimi yra neribotos apimties (begalinis sluoksnių tempimasis horizontalia kryptimi);
- kiekviename sluoksnyje medžiagų savybės yra homogeniškos, t. y. kad taške A_i ir B_i (1.4 pav.) medžiagos savybės yra vienodos;
- sluoksniai yra izotropiški, t. y. medžiagos savybės taške A_i yra vienodos visomis kryptimis;
- kiekvienoje sluoksnių sandūroje – visiška trintis (*angl. full friction*);
- nevertinamos šlyties jėgos paviršiuje;
- nevertinama sluoksnių masė (savasis svoris);
- dangos konstrukcija veikiama išskirstytos skritulio formos apkrovos, kurios forma yra artimiausia rato pėdsakui;
- dangos konstrukcija veikiama statine apkrova;
- dangos konstrukcijos reakcija į apkrovas apskaičiuota įvertinant sluoksnių storius h ir dvi medžiagų mechanines savybes: Puasono koeficientu ν ir tamprumo modulių E .



1.4 pav. Daugiasluoksnės dangos konstrukcijos sistemos schema (Yoder ir Witczak, 1975)

Fig. 1.4. Schema of multilayered elastic pavement structure (Yoder ir Witczak, 1975)

Nuo 1943 metų sukurta nemažai kompiuterinių programų skirtų dangos konstrukcijos įtempių ir deformacijų apskaičiavimui, kurių pagrindas yra tampumo teorija: BISAR, KENLAYER, ELSYM, EVERSTRESS, WESLEA, JULEA, MNLAYER ir t.t. Kai kurios papildytos tampriai klampiu medžiagų būvio įvertinimu (KENPAVE, APAS, VEROAD, VISCOROUTE, NOAH, HUURMAN ir VESYS), horizontaliomis apkrovomis (BISAR 3.0), susikibimo tarp sluoksnių pritaikymu (CIRCLY ir MNLAYER). Visuotinai priimta naujai sukurėtų programų skaičiavimų rezultatus lyginti su BISAR (Shell 1978) dėl šios programos matematinio stabilumo ir patikimumo, tačiau BISAR yra sena ir turinti trūkumų programa.

Khazanovich *et al.* (2008) ir Wang (2008) sukūrė MNLAYER programinį įrankį daugiasluoksnės tamprios kelio dangos konstrukcijos skaičiavimui pagrįstą Burmisterio sprendiniu, kuriuo tiksliai apskaičiuojami įtempiai ir deformacijos bet kuriame sluoksniuotos konstrukcijos gylyje. Programa lyginant su BISAR ir JULEA greičiau apskaičiuoja įtempius iki 19 sluoksnių konstrukcijoje.

Chabot *et al.* (2010) sukūrė 3D DSTM kompiuterinę programą VISCOROUTE, skirtą tampriai klampių dangos konstrukcijos sluoksnių reakcijos analizei nuo judančios apkrovos, kuris pritaikytas Prancūzų dangų konstravimo gide.

Erlingsson *et al.* (2013) programa ERAPAVE taip pat pagrįsta Burmisterio DSTM nestandžios asfalto dangos konstrukcijos reakcijos į apkrovą nustatymui įvertinant medžiagų ir aplinkos charakteristikas. Deformacijų koeficientui nustatyti taikytas Hankel parametras. Reakcijos parametrams netoli paviršiaus taikyta Richardson ekstrapoliacija. Apskaičiuotos tiesinės analizės reakcijos vertės esant

toms pačioms įvesties duomenų sąlygoms palygintos su KENPAVE ir WinJulea, ir nustatytas puikus sąryšis. Taip pat, ši programinė įranga pasižymi nesurištų pagrindo sluoksnių netiesinės analizės moduliu, pritaikytu įtempių priklausomybės elgsenai (*angl. stress dependent behaviour*). Netiesinės analizės reakcijos parametrai lyginant ERAPAVE ir KENPAVE, parodė gerą suderinamumą (Erlingsson *et al.* 2013).

Qiao *et al.* (2014) pritaikė NORDIC dangos konstrukcijos funkcionavimo prognozavimo modelį, kuris sukurtas Suomijoje VTT tyrimo institute. Šis dangos konstrukcijos funkcionavimo modelis susijęs su liekamųjų deformacijų prognozavimu dangos konstrukcijoje, o taip pat taikoma sutankinimo (*angl. Shakedown*) koncepcija nesurištiems pagrindo sluoksniams charakterizuoti.

Graczyk *et al.* (2016) pritaikė daugiasluoksnį tamprų metodą dinaminių apkrovų įtakos asfalto dangos konstrukcijai, įvertindami deformacijos energiją, tenkančią dangai, tarpsluoksnių bei rato ir dangos sukibimą.

Kelių inžinieriams pritaikytos kompiuterinės programos, pagrįstos daugiasluoksniu tampriu metodu tapusios klasikiniiais dėl skaičiavimų paprastumo bei spartumo. Tačiau DSTM prielaidos neatitinka realių kelių tiesybės medžiagų eksploatacijos sąlygų ir riboja plyšio plitimo, dinaminės apkrovos ir sukibimo uždavinių analizę (Elseif 2003).

Ekvivalentinio storio metodas (ESM) – dar kitaip vadinamas Odemark'o metodu. Odemark (1949) pasiūlė dviejų ar daugiau sluoksnių (su skirtingais v ir E) dangos konstrukciją transformuoti į ekvivalentinę atitinkamo storio vieno sluoksnio sistemą esančią konstrukcijos apačioje (Odemark 1949). Tuomet taikant Burmisterio (1943) formules nesudėtingai apskaičiuojami įtempiai ir deformacijos sistemoje. Šis dangos konstrukcijos reakcijos skaičiavimo metodas yra itin greitas. Ullidtz (1987, 1998) pritaikė ESM dangos įlinkio baseino perskaičiavimui bei įtraukė šį metodą į programinę įrangą ELMOD, skirtą FWD duomenų analizei.

Baigtinių elementų metodas (BEM) – tai kontinuumo būvio aproksimacija baigtinių elementų matricos atžvilgiu (Holzer 1985). Kitais žodžiais – sudalintos į baigtinio dydžio ir formos elementus erdvės bei priskirto kitimo dėsnio funkcijos skaičiavimams taikant diferencialines lygčių dalines išvestines susilietimo taškų sąryšiams, poslinkiams, įtempiams ir deformacijos nustatyti. Skaičiavimo tikslumas priklauso nuo daugelio faktorių: matricos tankumo t. y. elementų dydžio, elementų tipo, elementų išdėstymo ir jungimo taškų; ribinių sąlygų ir apkrovos charakterizavimo (ABAQUS 2014). BEM uždavinių sprendimui būtinos kompiuterinės programos, kelių inžinerijoje taikoma universali BEM skaičiavimo programinė įranga (pvz. ABAQUS, ANSYS, ALGOR ar pan.) bei specializuota kelių dangų konstrukcijų skaičiavimui (pvz. CAPA-3D, EVERSTRESS FE, ILLI-PAVE, MICHPAVE ar pan.). Dangos konstrukcijos modeliavimui tai-

koma plokštumos deformacijų (*angl. plane strain 2D*), simetrijos ašies (*angl. axisymmetric*) arba trijų dimensijų (3D) BEM formuluotės.

Raad *et al.* (1980) vieni pirmųjų pritaikė BEM 2D dangos konstrukcijos reakcijai skaičiuoti ir sukūrė programą ILLI-PAVE. Nuo tada daugelis mokslininkų analizavo dangos konstrukcijos reakciją taikydami baigtinių elementų metodus, kurio pritaikymas įvertina netiesinį sąryšį tarp įtempių ir tamprių, klampių, plastinių ir tampriai klampių deformacijų (Yoo *et al.* 2006; Al-Qadi *et al.* 2007; Ozer *et al.* 2012; Masad *et al.* 2014). Siddharthan *et al.* (2000) pasiūlė 3D dangos konstrukcijos analizės BEM programą 3DMOVE. Scarpas (2005; Scarpas 2000) sukūrė BEM pagrįstą skaičiavimo programą CAPA-3D dangos konstrukcijos ir gruntų statinei ir dinaminei analizei trijų dimensijų koordinatinių sistemoje. Wang (2011) tyrimo objektas padangos ir dangos paviršiaus sukibimo poveikis dangos konstrukcijos reakcijos modeliui, kuris taip pat buvo pagrįstas baigtinių elementų metodu. Carvalho (2012) sukūrė modelį, kuriuo įvertintos liekamųjų deformacijų didėjimas.

Baigtinių elementų metodas plačiai taikomas dangos konstrukcijos modeliavimui. Tačiau norint gauti tikslūs BEM sumodeliuotos dangos konstrukcijos rezultatus, reikia tam tikrų duomenų bei specifinių žinių. Pakeitus BEM dangos konstrukcijos medžiagas mechaniniam modeliui reikalingas patikslinimas. Visais atvejais reikalinga programinė įranga.

Diskretinių elementų metodas (*angl. Discrete (Distinct) Element Method – DEM*) – tai baigtinio dydžio dalelių poslinkių skaičiavimas, pagrįstas jų tarpusavio sąveika taikant normalinės, tangentinės ir kontakto sąveikos lygtis. Deformacijos gruntuose ir mineralinių medžiagų mišiniuose susidaro dėl grūdelių poslinkio ir atskirų dalelių tarpusavio praslydimo ir pasisukimo esant apkrovos poveikiui. Apskaičiavus visų dalelių poslinkio trajektoriją apkrovos ir viena kitos atžvilgiu nustatoma visos struktūros deformacija. Diskretinių elementų modeliavimas atsižvelgia į: dalelių trintį, sąlyčio pobūdį, dalelių svorį (traukose jėga priklausanti nuo dalelės medžiagos tankio ir gravitacijos jėgos), dalelių tarpusavio trauką (adhezinės ir kohezinės jėgos).

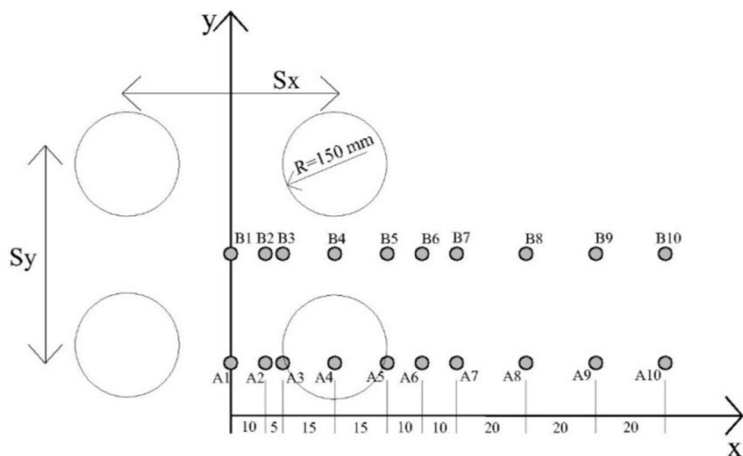
Vienas pirmųjų dalelių sąveikos mechaninių jėgų teoriją plėtojo Cundall *et al.* (1979), kurie aprašė dviejų dimensijų apskritimų modelį. DEM dažniausiai taikomas gruntų tyrimams. Uthus *et al.* (2008) modeliavo atsistatymo modulio bandymą 3D DEM metodu, ir nustatė, jog sudėtingiausia apibrėžti natūralaus grunto dalelių mineralogines, anisotropines ir nelygumo savybes, kurios ženkliai paveikė galutinį skaičiavimo rezultatą. Asfalto mišiniam DEM metodas taikomas kartu su mišinio X-ray tomografijos duomenimis, analizuojant konkretaus mišinio dalelių padėtį bandinyje (Adhikari *et al.* 2010). Markauskas *et al.* (2006) sukūrė dviejų dimensijų įvairaus dydžio mineralinių užpildų dalelių sutankinimo bandymo skaičiuojamąjį modelį, pagrįstą tarpusavio kontakto jėgomis. Rimša (2014; Rimša *et al.* 2014) analizavo diskretinių elementų metodą, kurį pritaikė

asfalto kompozito ir dalelių tarpusavio tamprumo modeliavimui sukurdamas diskretų pusiau analizinį modelį.

Nors DEM skaitinis modelis yra artimiausias realiai asfalto mišinio struktūrai, visgi šis metodas dar nėra detalai išanalizuotas ir ištyrinėtas dėl techninių kliūčių, trukdančių tiksliai įvertinti mineralinės medžiagos ir bitumo plėvelės mechanines savybes. Tačiau tikėtina, kad ateityje nestandžios dangos konstrukcijos skaičiavimo modelis galėtų būti pagrįstas DEM.

Nepriklausomai nuo dangos konstrukcijos reakcijos į apkrovas nustatymo metodo, įtempiai ir deformacijos turi būti nustatytos kritiniuose dangos konstrukcijos taškuose norint pritaikyti funkcionavimo modelius (1.2.1 poskyris). Taip pat, svarbu parinkti reakcijos analizės taškus atsižvelgiant į apkrovos poziciją dangoje. Dangos konstrukcijos reakcijos vertinimui rekomenduojama taikyti MEPDG analizės (skaičiuojamųjų) taškų išdėstymo schemą pagal krovininio automobilio judėjimo trajektoriją, kuri pateikta 1.5 paveiksle.

Apibendrinant 1.3.1 poskyryje atliktą literatūros analizę, dangos konstrukcijos reakcijos į apkrovą vertinimui analizuojant tamprias medžiagų savybes rekomenduojama taikyti daugiasluoksniškumo teoriją ir skaičiuojamąsias programas BISER arba MNLAYER. Analizuojant tampriai klampias medžiagų savybes baigtinių elementų arba daugiasluoksniškumo teorijas atitinkamai taikant ABAQUS arba VISCOROUTE skaičiuojamąsias programas.



1.5 pav. Dangos konstrukcijos reakcijos analitinio skaičiavimo analizės taškų schema MEPDG (NCHRP 1-37A 2004a)

Fig. 1.5. The schema of analysis point for pavement response calculation in MEPDG (NCHRP 1-37A 2004a)

1.3.2. Asfalto dangos konstrukcijos medžiagų savybių nustatymo ir vertinimo analizė

Dangos konstrukcijos sluoksnių medžiagų savybės sąlygoja dangos reakciją į apkrovas ir funkcionavimą. Asfalto dangos konstrukcija paprastai projektuojama su vieno arba dviejų asfalto sluoksnių danga, įrengta ant surišto arba nesurišto pagrindo ir sutankintos žemės sankasos. Asfalto dangos konstrukcijos medžiagos pasižymi tampriomis, klampiomis, tampa klampiomis arba plastinėmis deformacijomis. Skaitiniuose modeliuose deformacijos (medžiagų elgsena) įvertinamos mechaniniais modeliais bei jų sąsaja su fizikinėmis ir mechaninėmis savybėmis.

Priklausomai nuo analizei pasirinkto skaičiuojamo metodo (1.3.1 poskyryje), priklauso ir sluoksnių medžiagas apibūrinantys įvesties duomenys. Taikant daugiasluksnį tamprų metodą, medžiagos apibūrinamos tamprumo moduliu ir Puasono koeficientu.

Norint atlikti dangos konstrukcijos analizę bei įvertinti tampa klampias ar plastines savybes, svarbu nustatyti medžiagų dinaminio tamprumo modulio kitimą laiko arba dažnio atžvilgiu esant pastovioms deformacijoms arba įtempimams. Šiame poskyryje glaustai aprašyti bendrieji teoriniai medžiagų mechaniniai modeliai, asfalto mišinio, bituminio rišiklio, nesurįštų pagrindo ir žemės sankasos medžiagų savybių, jų tyrimo metodai.


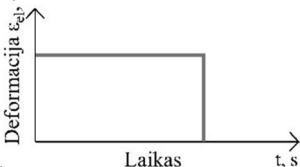

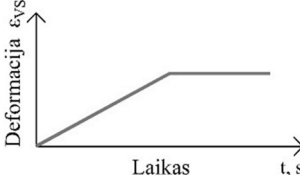

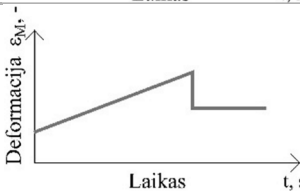
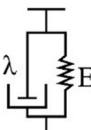
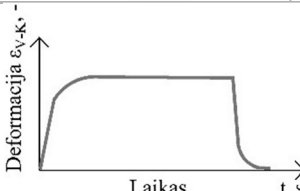
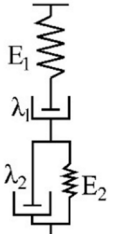
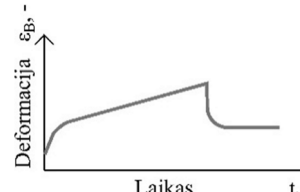
1.3.2.1. Reologiniai modeliai ir jų taikymas

Medžiagų reakcija ir elgsena apibūrinama reologiniais modeliais, kurie nusako įtempimų ir deformacijų kitimą laiko atžvilgiu. Kelių inžinerijoje dažniausiai taikomi medžiagų reologijos (elgsenos) mechaniniai modeliai pateikti 1.2 lentelėje. Medžiagos, kurių reakcija į apkrovą yra tampri, t. y. atsistato ir grįžta į pradinę padėtį po apkrovos (žymima, kaip spyruoklė, tamprumo modulis E). Medžiagos, kurių reakcija į apkrovą yra klampi, t. y. palaipsniui deformuojasi nuo apkrovos ir neatsistato (žymima, kaip taškas, klampa λ).

Atsižvelgiant į medžiagų elgseną asfalto dangos konstrukcija apibūrinama kaip tampa klampiomis plastinėmis savybėmis pasižyminčių dangos sluoksnių įrengtų ant tampa plastiško pagrindo struktūra (Hogentogler *et al.* 1929; Yoder *et al.* 1975; Huang 2004).

Eksperimentinių tyrimų metu nustatytiems rezultatams pritaikyti dažnai juos tenka konvertuoti, pervarkyti iš deformacijų kitimo dažnio/osciliacijos atžvilgiu į laiko ir atvirkščiai. Mun *et al.* (2007) ir Underwood *et al.* (2009) analizavo du metodus modulio priklausomybei nuo dažnio ir laiko nustatyti: aproksimacijos (Park *et al.* 1999; Schapery *et al.* 1999) ir tiesioginį (Biot 1954; Christensen 1982). Teigiama, kad abiem metodais paskaičiuotos paklaidos yra labai mažos lyginant su išmatuotomis vertėmis. Pasirinkta taikyti tiesioginį metodą dinaminio tamprumo modulio konvertavimui į relaksacijos modulį.

1.2 lentelė. Kelių inžinerijoje taikomi medžiagų elgsenos mechaniniai modeliai
Table 1.2. Material behavior models for pavement structure

Modelio pavadinimas	Žymėjimas	Deformacijos kreivė kai apkrova	Funkcija, kai: $\sigma(t) = \sigma_{const.}$
Tamprus			$\varepsilon_{el.}(t) = \frac{\sigma_{const.}}{E}$
Klampus			$\varepsilon_{vs}(t) = t \cdot \frac{\sigma_{const.}}{\lambda}$
Maxwellio			$\varepsilon_M(t) = \frac{\sigma_{const.}}{E} + t \cdot \frac{\sigma_{const.}}{\lambda}$
Voigt-Kelvin			$\varepsilon_{V-K}(t) = \frac{\sigma_{const.}}{E} \cdot \left(1 - e^{-\frac{E}{\lambda}t} \right)$
Burgerio			$\varepsilon_B(t) = \frac{\sigma_{const.}}{E_1} + t \cdot \frac{\sigma_{const.}}{\lambda_1} + \frac{\sigma_{const.}}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2}{\lambda_2}t} \right)$

Dinaminio tamprumo modulio nustatyto prie ciklinės apkrovos konvertavimas į laiko domeną atliekamas taikant generalizuotą Maxwell (arba Wiechert) modelį (*angl. Generalized Maxwell or Wiechert model*) (Schapery *et al.* 1999; Park *et al.* 1999). Generalizuotas Maxwell modelis (1.6. pav.) sudarytas iš lygiagrečių Maxwell elementų, reprezentuojančių kiekvieno žingsnio spyruokles

(tamprias savybes) ir taškus (klampias savybes). Algebrinė modelio išraiška dažniausiai aprašoma Prony (arba kitaip Direchlet) serija:

$$E(t) = E_e + \sum_{i=1}^m E_i e^{-(t/\rho_i)}, \quad (1.6)$$

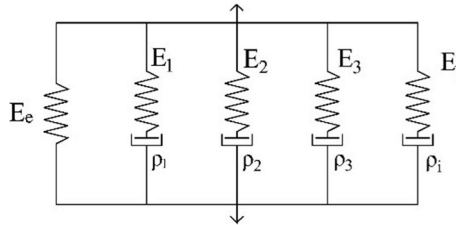
$$\rho_i = \frac{\eta_i}{E_i}, \quad (1.7)$$

čia E_e – log-laiko pusiausvyros modulis, MPa; E_i – relaksacijos standumas, MPa; t – laikas, s; ρ_i – relaksacijos laikas, s; η_i – klampumo koeficientas.

Taigi, E_e – tamprumo modulio vertė esant didžiausiam apkrovos laikui, η_i ir E_i Prony serijos kintamieji, nustatomi funkcijos optimizacijos būdu. Schapery et al. (1999) ir Park *et al.* (1999) nustatė, kad $E(t)$ tiksliausiai apskaičiuojama taikant dinaminį realųjį modulį $E'(\omega)$ pagal 1.8 formulę, kuriam Prony serijos formulė 1.9:

$$E'(\omega) = E^* \cos(\varphi), \quad (1.8)$$

$$E'(\omega) = E_e + \sum_{i=1}^m \frac{\omega^2 \rho_i^2 E_i}{\omega^2 \rho_i^2 + 1}. \quad (1.9)$$



1.6 pav. Generalizuoto Maxwell modelio schema

Fig. 1.6. The schema of generalized maxwell or wiechert model

1.3.2.2. Asfalto dangos konstrukcijos sluoksnių medžiagų savybių nustatymas

Dangos konstrukcijos taip pat kaip ir kitų statybinių medžiagų savybės skirstomos į grupes (Nagrocekienė et al. 2009): fizikinės, mechaninės, fizikinės-cheminės, technologinės ir eksploatacinės. Dangos konstrukcijos projektavimo aspektu dažniausiai vertinamos fizikinės, mechaninės ir eksploatacinės savybės.

Fizikinės savybės apibrėžia medžiagą ir jos santykį su aplinkos veiksniais per tankį, sudėtį (oro tuštymių kiekį, rišiklio kiekį, granulimetrinę sudėtį ir

pan.), tūrinį, drėgnį, vandens įgeriamumą, šilumos laidumą, dalelių formą ir skeltą paviršių, minkštėjimo/tąsumo/plastiškumo tyrimus, atsparumą šalčiui ir t. t.

Mechaninės savybės apibrėžia medžiagos reakciją į apkrovą ir veikiamas jėgas. Mechaninių savybių nustatymo bandymai skiriami į neardančiuosius ir ardančiuosius, kuriems dar gali būti suteikiama dinaminė arba statinė apkrova. Mechaninių neardančiųjų savybių bandymų tikslas nustatyti medžiagos ar sluoksnio tamprumo modulį tiesiškai tampriame arba tampriai klampiam būvyje. Mechaninių ardančiųjų savybių bandymai (stipris, nuovargis, deformacija), dar kartais vadinami funkcionavimo (*angl. performance*) bandymais, skirtais ribinėms sąlygoms (pvz. nuovargio, plastinių deformacijų), prie kurių bandinys arba sluoksnis suyra, nustatyti.

Ekspluatacinės savybės apibrėžia medžiagos funkcionavimą eksploatacijos ir aplinkos poveikio įtaką medžiagos fizinėms ir mechaninėms savybėms išreikšiamos per senėjimą, ilgaamžiškumą ir patvarumą: atsparumą dilumui, triukšmo generavimą, nelygumą.

Taigi apibendrinant, dangos konstrukcijos projektavimui ir skaičiavimams taikomos mechaninės savybės, nustatytos neardančiais bandymais, dangos konstrukcijos funkcionavimas prognozuojamas remiantis mechaninių ardančiųjų savybių bandymų rezultatais.

Asfalto mišinys sudarytas iš mineralinių medžiagų užpildų karkaso, surišto bituminiu rišikliu su oro tuštymėmis. Asfalto savybės, kaip ir kitų kompozitinių medžiagų, priklauso nuo sudėtinių elementų elgsenos bei jų tarpusavio sąveikos. Mineralinių medžiagų užpildai veikia kaip tampraus būvio medžiaga, bituminis riškis – klampaus būvio organinė medžiaga (Paliukaite 2014: 166), todėl šių medžiagų kompozitas – asfaltas – funkcionuoja kaip tampriai klampi (tampriai tąsi) arba valkšni medžiaga. Tampriosios asfalto mišinio savybės priklauso nuo užpildų granulometrinės sudėties ir rūšies. Klampios asfalto mišinio savybės priklauso nuo bitumo reologinių ir mechaninių savybių, jo kiekio, mastikos (bitumo ir smulkiųjų užpildų mišinio) savybių. Dėl šios tampriai klampios elgsenos asfalto mišinio įtempimai ir deformacijos veikiant apkrovai priklausomai nuo laiko/dažnio ir temperatūros. Asfalto mišinyje veikiant apkrovai susidaro atsistatančios (tampriai klampios) arba neatsistatančios (klampiai plastiškos) deformacijos (Perl *et al.* 1983; Sides *et al.* 1985; Huang *et al.* 2011).

Asfalto dangos konstrukcijos projektavimui taikomas tamprumo modulis, o tiksliau, dinaminio tamprumo modulio kompleksinė kreivė, yra esminė asfalto mišinio elgseną apibūrinanti funkcija. Dinaminis tamprumo modulis – tai funkcija, apibūrinanti deformacijų ir įtempimų santykį tampriai klampiose ribose prie charakteringų sinusoidinės apkrovos dažnių ir temperatūrų. Nustačius dinaminį tamprumo modulį, užduodant tiesiškai tampriai klampias deformacijas, prie skir-

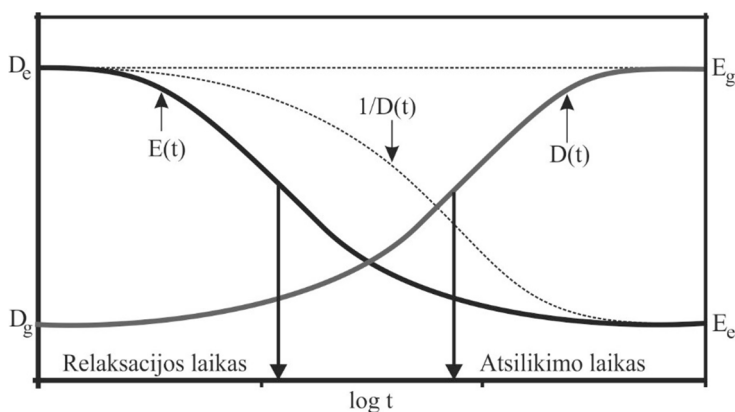
tingų temperatūrų ir dažnių galioja laiko-temperatūros superpozicijos principas, ir galima suformuoti kompleksinę kreivę prie referencinės temperatūros.

Tamprumo modulio kitimo funkcija laiko atžvilgiu apibūdinama relaksacijos arba valkšnumo procesais, kurie asfalto mišinių tiesiškai tampriai klampiam būvyje yra atvirkščiai proporcingi (1.3 lentelę 1.7 pav.). Tamprumo modulio relaksacija apibūdinama kaip įtempimų ir deformacijų santykis, tuo tarpu valkšnumas deformacijų ir įtempimų santykiu.

1.3 lentelė. Moduliai tampraus ir tampriai klampaus būvio apibūrinimui

Table 1.3. Definition of elastic and viscoelastic modulus

Modulis	Tamprusis būvis	Tampriai klampus būvis	
		Relaksacija	Valkšnumas
Tamprumo	$E = 2(1 + \nu) \cdot G$	$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0}$	$D(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0}$
Šlyties	$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$	$G(t)$	$J(t)$
Standumo	$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$	$K(t)$	$M(t)$



1.7 pav. Teorinis relaksacijos ir valkšnumo modulių kitimo laike kreivės (Kim 2009)

Fig. 1.7. Creep compliance and relaxation modulus curves (Kim 2009)

Dažniausiai asfalto mišinių tamprumo moduliui ir jo kompleksinei kreivei nustatymui taikomas sinusoidinės apkrovos ašinio gniuždymo metodas (AASHTO T342-11 2013), tačiau gali būti taikomi ir kiti metodai (LST EN 12697-26 2012; Di Benedetto *et al.* 2001):

- dviejų taškų lenkimo;

- trijų taškų lenkimo;
- keturių taškų lenkimo;
- netiesioginio tempimo;
- ašinio gniuždymo arba gniuždymo ir tempimo.

Asfalto mišinio tampriai klampios savybės prie žemų ir vidutinių temperatūrų gali būti nustatomos netiesioginio tempimo valkšnumo modulio bandymu (Dave 2009; Roque *et al.* 1992), trijų taškų lenkimo bandymu (Zofka *et al.* 2005; Zofka *et al.* 2008; Zofka 2007; Velasquez *et al.* 2011).

Lietuvoje asfalto mišinių mechaninių savybių tyrimams dažniausiai taikomi keturių taškų lenkimo (4PB) ir netiesioginio tempimo bandymo (IDT) metodai (Vaitkus *et al.* 2016; Vaitkus *et al.* 2014; Vaitkus *et al.* 2013). Nepriklausomai nuo metodo asfalto mišinio tamprumo modulis turėtų būti tas pats. Daroma prielaida, kad asfalto mišinys sąlyginai yra tiesiškai tampriai klampus, tačiau dėl izotropiškumo kompleksinis modulis kinta priklausomai nuo deformacijų amplitudės. Todėl prieš atliekant kompleksinio modulio bandymus turi būti nustatomos tiesiškai tamprios ribos (Di Benedetto *et al.* 2001).

Netiesioginio tempimo bandymo metodas yra vienas populiariausių bandymų asfalto mišinių tyrimams, nes gali būti atliekamas ėminiams iš įrengtos ar eksploatuojamos dangos konstrukcijos. Šis metodas dažnai taikomas asfalto mišinių tampriai klampių savybių, tamprumo, atsistatymo, relaksacijos arba valkšnumo, atsparumo nuovargiui charakteristikoms nustatyti.

Tampriosios stadijos netiesioginio tempimo geometrijos gniuždomųjų ir tempiamųjų įtempimų sprendimas pasiūlytas Hertz (1881) pateiktas formulėse:

$$\sigma_{tem} = \frac{2F}{\pi dh} \quad ir \quad \sigma_{gn} = -\frac{6F}{\pi dh}, \quad (1.10 \text{ ir } 1.11)$$

čia σ_{tem} – tempiamieji įtempimai; σ_{gn} – gniuždomieji įtempimai; F – apkrova; d – bandinio diametras; h – bandinio aukštis.

Hondros (1959) nustatė cilindriniam bandinyje (1.8 pav.) pasikartojančių radialinio gniuždymo įtempimų zonas (1.12 ir 1.13 formulės) ir išvedė tamprųjų deformacijų įtempimų sąlygas (1.14 ir 1.15 formulės).

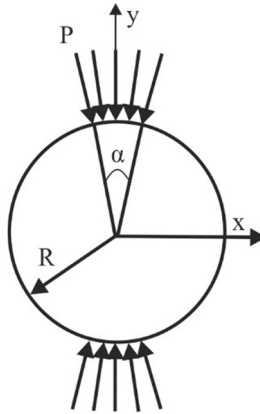
$$\sigma_{xx}(x,0) = \frac{2F \left[-\arctan \left(\frac{\left(1 - \frac{x^2}{R^2}\right) \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{1 + \frac{x^2}{R^2}} \right) + \frac{\left(1 + \frac{x^2}{R^2}\right) \sin(\alpha)}{1 + \frac{x^4}{R^4} + \frac{2x^2 \cos(\alpha)}{R^2}} \right]}{a\pi h}, \quad (1.12)$$

$$\sigma_{yy}(0, y) = \frac{-2F \left[\arctan \left(\frac{\left(1 + \frac{y^2}{R^2}\right) \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{1 - \frac{y^2}{R^2}}\right) + \frac{\left(1 - \frac{y^2}{R^2}\right) \sin(\alpha)}{1 + \frac{y^4}{R^4} - \frac{2y^2 \cos(\alpha)}{R^2}} \right]}{a\pi h}, \quad (1.13)$$

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{E} (\sigma_{xx} - \nu \sigma_{yy}), \quad (1.14)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{1}{E} (\sigma_{yy} - \nu \sigma_{xx}), \quad (1.15)$$

čia a – apkrovos juostos plotis.



1.8 pav. Netiesioginio tempimo bandymo geometrija

Fig. 1.8. Geometry of indirect tension test

Horizontaliąsias tempimo deformacijas taip pat galima apskaičiuoti pagal formulę (Witczak et al. 2002):

$$\varepsilon_{xx} = \delta_{xx} \left(\frac{2(1+3\nu)}{d(a+b\nu)\pi} \right), \quad (1.16)$$

čia δ_{xx} – skersinės horizontaliosios deformacijos; b – daviklių ilgis arba atstumas, kuriame matuojamos deformacijos.

Tamprumo modulio apskaičiavimo formulė iš netiesioginio tempimo bandymo pagal LST EN 12697-26 (2012) Priedą C, kai deformacija matuojama horizontaliai įtvirtintais davikliais, gali būti apskaičiuojamas pagal formulę 1.17:

$$E = \frac{F \cdot (\nu + 0,27)}{(z \cdot h)}, \quad (1.17)$$

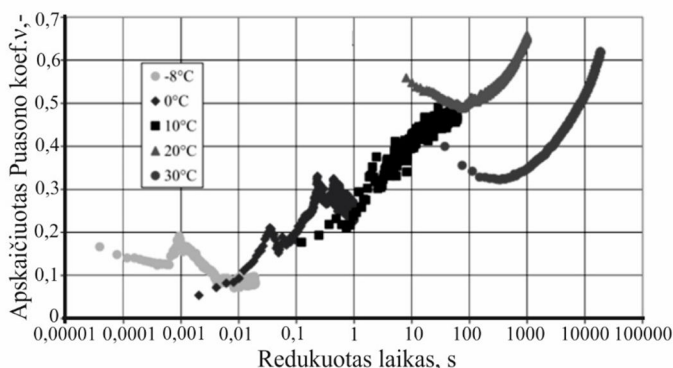
čia z – horizontaliosios deformacijos amplitudė nustatyta ciklinio bandymo metu, mm.

Puasono koeficientas apibrėžia medžiagos išilginės ir skersinės deformacijų proporcingumą tampriojoje įtempimų ir deformacijų srityje. Puasono koeficientas tampriai klampioms medžiagoms valkšnumo bandymo metu ženkliai kinta ir nėra pastovus (Hilton 2001; Desroches *et al.* 2015). Roque ir Buttlar (1992) patobulino netiesioginio tempimo tamprumo modulio valkšnumo bandymą ir duomenų analizavimo metodiką (Roque *et al.* 1992; Buttlar *et al.* 1994). Kadangi šio netiesioginio tempimo valkšnumo modulio bandymo metu, fiksuojamos vertikaliosios deformacijos bandinio centre, Puasono koeficientas gali būti apskaičiuotas pagal formulę 1.19 (Roque *et al.* 1992).

$$\nu = -0,1 + 1,48 \cdot \left(\frac{\Delta U}{\Delta V} \right)^2 - 0,778 \cdot \left(\frac{L}{D} \right)^2 \left(\frac{\Delta U}{\Delta V} \right)^2, \quad (1.18)$$

čia ΔU ir ΔV – horizontaliųjų ir vertikalųjų poslinkių skirtumas; D – bandinio diametras; L – bandinio aukštis.

Netiesioginio tempimo metodu nustatyto Puasono koeficiento kitimas priklausomai nuo temperatūros ir laiko pateiktas 1.9 paveiksle (Katicha 2007).



1.9 pav. Netiesioginio tempimo metodu nustatyto Puasono koeficiento kitimas priklausomai nuo temperatūros ir laiko (Katicha 2007)

Fig. 1.9. Poisson's ratio determined from the IDT test variation associated with temperature and time (Katicha 2007)

Witczak *et al.* (1999) išvedė regresijos formulę asfalto mišinių Puasono koeficientui apskaičiuoti, kuri pritaikyta tiek MEPDG (NCHRP 1-37A 2004b; Witczak *et al.* 2002) tiek ir RDO Asphalt 09 (FGSV 498 2009):

$$\nu = 0,15 + \frac{0,35}{1 + e^{(3,1849 - 0,04233 \left(\frac{9}{5} T + 32 \right))}}, \quad (1.19)$$

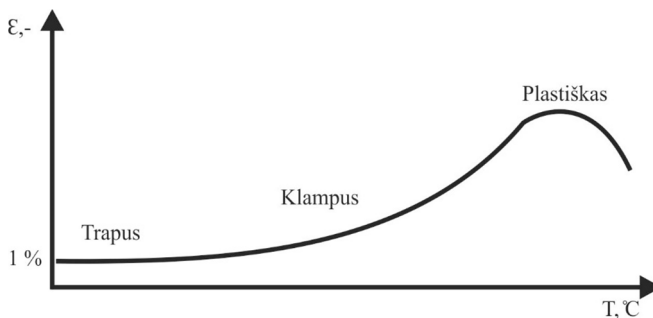
čia T – temperatūra bandymo metu.

Puasono koeficientas asfalto sluoksniams yra tarp 0,25 ir 0,4, priklausai nuo temperatūros ir apkrovos laiko ar dažnio, tačiau dažniausiai priimamas kaip pastovus – 0,35 (Khosravifar *et al.* 2015; Desroches *et al.* 2015; FGSV 430 2009).

1.3.2.3. Bituminių rišiklių bandymo metodų analizė

Bitumas ir bituminiai rišikliai organinės kilmės, jų kokybę ir funkcionavimą nulemia perdirbimui naudojamas naftos tipas, technologija ir priedai (Nellenstyen 1924; Petersen *et al.* 1994; Read *et al.* 2003; Paliukaite 2014). Dėl organinės kilmės bitumo ir bituminių rišiklių savybės kinta keičiantis temperatūrai ir laikui. Esant aukštai temperatūrai bitumas tampa plastiškas ir skystas, vidutinių temperatūrų – klampus, o žemų temperatūrų – trapus (1.10 pav.). Taip pat bitumo savybės (cheminė ir komponentinė sudėtis) dėl oksidacijos procesų ilgainiui keičiasi kietėja/senėja (Brown *et al.* 1957; Lesueur 2009; Simonen *et al.* 2013; Paliukaitė *et al.* 2015). Bituminio rišiklio savybėms nustatyti prie skirtingų temperatūrų taikomi skirtingi eksperimentiniai metodai, modeliuojantys plastiško, klampaus arba trapaus bituminio rišiklio elgseną (1.10 pav.).

Bituminių rišiklių reologinės savybės tiriamos nuo 1950-ųjų, (Van der Poel 1954) pateikė bituminių rišiklių charakterizavimo monogramas penetracijos indeksui PI nustatyti.

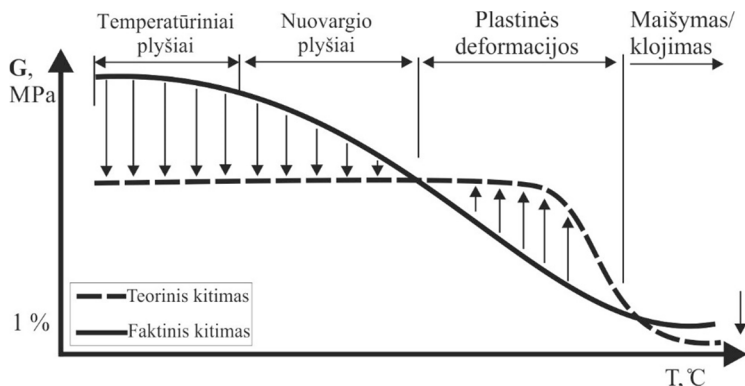


1.10 pav. Bitumo suirimo deformacijų ir savybių priklausomybės nuo temperatūrai schema (Bahia *et al.* 2001; Kim 2009)

Fig. 1.10. The schema of asphalt binders strain at failure change with temperature (Bahia *et al.* 2001; Kim 2009)

Van der Poel (1954) taip pat laikomas kompleksinių kreivių koncepcijos bitumo ir asfalto mišinių modulių charakterizavimo pradininku. Dobson (1969) teigė, kad Van der Poel (1954) pasiūlyta metodas yra apytikslis ir nėra tinkamas skaičiuojamajai analizei. Dobson (1969) pateikė bitumo savybių apibrėžimą atsižvelgiant į bitumo jautrumą temperatūrai ir šlyčiai. Bitumo jautrumas temperatūrai įvertinamas adatos penetracija, minkštėjimo temperatūra, klampa (McLeod 1968; Jongepier *et al.* 1969; Jongepier *et al.* 1970; Puzinauskas 1979). Jautrumas šlyčiai nustatomas iš klampos bandymų ir apibrėžiamas kompleksiniu tekėjimo laipsniu „C“ (*angl. degree of complex flow*) (Traxler *et al.* 1944; Gallaway 1957; Moavenzadeh *et al.* 1967) bei šlyties indeksu (*angl. shear index*) (Zube *et al.* 1969; Culley 1969; Kandhal *et al.* 1973). Li *et al.* (2006) tyrė regeneruotą iš eksploatuojamo kelio bitumą. Didžiausi bitumo mechaninių savybių pokyčiai esant aukštoms ir žemoms temperatūroms nustatyti asfalto viršutinio sluoksnio bitumo, kuris ir yra labiausiai veikiamas aplinkos poveikio.

Tačiau adatos penetracijos, minkštėjimo temperatūros ir klampos savybės vertinamos atskirai ir neatspindi faktinių bitumo funkcionavimo sąlygų. Dickinson (1974) teigė, kad dinaminio šlyties modulio kompleksinė kreivė (1.11 pav.) nustatyta esant mažoms deformacijų amplitudėms prie skirtingų temperatūros ir dažnio sąlygų yra artimiausia bituminio rišiklio elgsenai asfalto dangos sluoksnyje. Bitumo reakcija į skirtingų dažnių osciliacinio pobūdžio apkrovas prie skirtingų temperatūrų tiriama dinaminiu šlyties reometru DSR (Dickinson 1974; Goodrich 1988; Anderson *et al.* 1994; Anderson *et al.* 1994; Christensen *et al.* 1996; Marasteanu *et al.* 2000; Chehab *et al.* 2002; Airey *et al.* 2004; Rowe *et al.* 1995; Farrar *et al.* 2013).

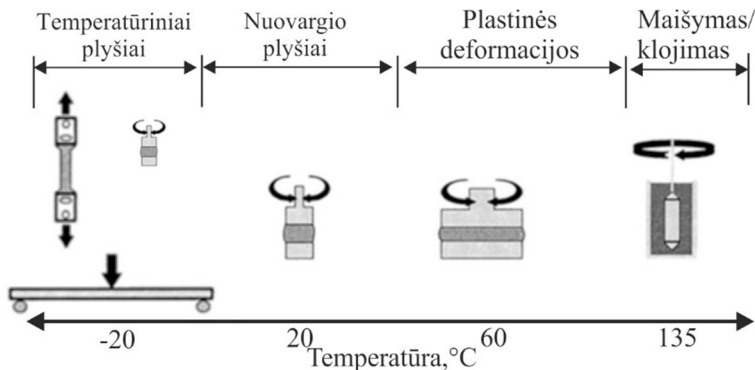


1.11 pav. Bituminio rišiklio šlyties modulio kompleksinė kreivė temperatūros atžvilgiu (Bahia *et al.* 2001; Kim 2009)

Fig. 1.11. The mastercurve of bitumen binder according to temperature (Bahia *et al.* 2001; Kim 2009)

Europoje bituminiai rišikliai skirstomi į klases pagal penetraciją, minkštėjimo temperatūrą ir tampriąją atstatą (LST EN 12591 2009; LST EN 14023 2011). Šiaurės Amerikoje bituminiai rišikliai klasifikuojami į eksploatacijos klases (1.12 pav.) atsižvelgiant į klampą, kompleksinį šlyties, modulį po trumpalaikio sendinimo ir po ilgalaikio sendinimo etapų, valkšnumo stiprumą ir atsparumą tempimui (AASHTO M320-10 2010).

Tiriant tradicines reologines bitumo savybes nustatyta, kad prie tam tikrų sąlygų bituminiai rišikliai funkcionuoja tiesiškai tampriai klampiam būvyje ir gali būti analizuojamos kaip termoreologiškai paprastos (*angl. thermorheologically simple TRS*) medžiagos, kurioms galioja laiko-temperatūros suprepozicijos principas (Dobson 1969; Jongepier *et al.* 1969; Lytton *et al.* 1993; Kim *et al.* 1994; Anderson *et al.* 1994). Tai yra, kad nustatytos bituminio rišiklio savybės esant tam tikroms apkrovos ir temperatūros sąlygomis gali būti horizontaliai perslenkamos dažnio arba laiko atžvilgiu.



1.12 pav. Bituminio rišiklio tyrimo metodai eksploatacijos klasėms nustatyti (Kim 2009; Sui *et al.* 2011)

Fig. 1.12. The Superpave grading test for bitumen binders (Kim 2009; Sui *et al.* 2011)

Taikant superpozicijos principą bei suformavus kompleksinę kreivę prie referencinės temperatūros modulis gali būti perskaičiuojamas prie bet kurio dažnio ar temperatūros. Kompleksinė kreivė gali būti sudaroma tiek asfalto mišiniams tiek ir bituminiams rišikliams, svarbiausia, kad modulis būtų nustatytas LVE ribose prie skirtingų dažnių ir temperatūrų. Bituminio rišiklio šlyties modulio kompleksinė kreivė modeliuoja bitumo reologines savybes bei yra tiesiogiai taikoma asfalto mišinių tamprumo modulio apskaičiavimui bei dangos konstrukcijos reakcijos į apkrovą skaičiavimams bei funkcionavimo prognozavimui.

Kompleksinė kreivė sudaroma perslenkant nustatytus modulius laiko arba dažnio atžvilgiu į kuo tolygesnę vientisą kreivę. Pellinen *et al.* (2003), Pellinen

et al. (2002) ir Witczak *et al.* (2000) nustatė, kad modulio kompleksinė kreivė panašiausia į sigmoidinę funkciją. Būtent šis modelis yra plačiausiai paplitęs ir įtrauktas į MEPDG medžiagų mechaninių savybių vertinimo metodiką (NCHRP 1-37A 2004a). Sigmoidinio modelio (*angl. Sigmoidal model*) schema pateikta 1.13 paveiksle a) ir matematiškai apibūrintas formule (Pellinen *et al.* 2003):

$$\log|G^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\log(\omega_R))}}, \quad (1.20)$$

čia ω_R – redukuotas dažnis (rad/s) pagal referencinę temperatūrą; δ – žemesnioji funkcijos asimptotė; α – skirtumas tarp žemosios ir aukštosios asimptotės; β, γ – apibrėžia kreivės formą tarp asimptočių.

Sigmoidinis modelis daugiausia taikomas asfalto mišinių tamprumo modulio kompleksinės kreivės charakterizavimui (Pellinen *et al.* 2003; Pellinen *et al.* 2002; Witczak *et al.* 2000), tačiau gali būti taikomas ir bituminiams rišikliams (Yusoff *et al.* 2013).

Rowe *et al.* (2009) nustatė, kad asfalto mišinių kompleksinė kreivė ne visuomet yra proporcinga ir pristatė patobulintą sigmoidinį modelį dar kitaip vadinamą Richardso modeliu (*angl. Generalized Logistic Sigmoidal Model or Richards Model*):

$$\log|G^*| = \delta + \frac{\alpha}{\left[1 + \lambda e^{\beta + \gamma(\log(\omega_R))}\right]^{1/\lambda}}, \quad (1.21)$$

čia λ – funkcijos kintamasis apibrėžiantis sigmoidinės kreivės asimetriškumą.

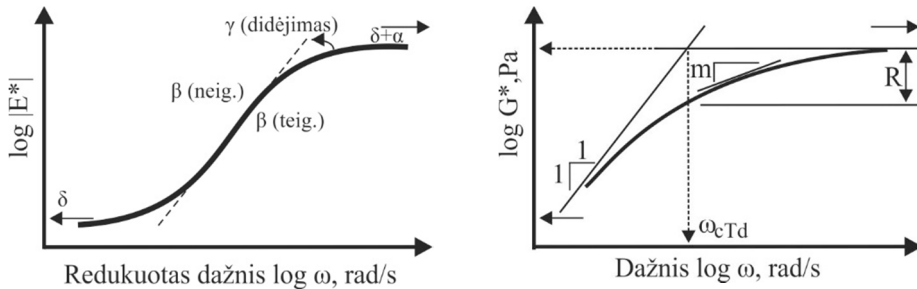
Rowe (2009) analizavo fazės kampo priklausomybę pagal kompleksinę šlyties modulio kreivę bei pritaikė Richards modelį jam apskaičiuoti:

$$\varphi(\omega) = -90\alpha\gamma \frac{e^{(\beta + \gamma \log(\omega))}}{\left[1 + \lambda e^{\beta + \gamma(\log(\omega))}\right]^{(1+1/\lambda)}}. \quad (1.22)$$

Christensen *et al.* (1996) sukūrė CA modelį bituminių rišiklių LVE reologinių savybių charakterizavimui (1.23 formulę ir 1.14 pav. b)) paremtą bitumo dinaminės mechanikos analize (*angl. dynamic mechanical analysis*).

$$|G^*| = G_g \left[1 + \left(\frac{\omega_c}{\omega} \right)^{\log(2/R)} \right]^{R/\log 2}, \quad (1.23)$$

čia G_g – trapumo modulis (*angl. Glassy modulus*) t. y. didžiausias šlyties modulis; ω_c – susikirtimo taško dažnis (*angl. Crossover frequency*); ω – dažnis, rad/s; R – reologinis indeksas pagal $R = \log(|G^*|/G_g)$.



1.13 pav. Kompleksinės kreivės formos funkcijos: a) Sigmoidinis modelis (Pellinen *et al.* 2003); b) Christensen-Anderson modelis (Christensen *et al.* 1996)

Fig. 1.13. The shape function of mastercurve: a) Sigmoidal model (Pellinen *et al.* 2003); b) Christensen-Anderson modelis (Christensen *et al.* 1996)

Yusoff *et al.* (2013) analizavo skirtingus matematinius ir mechaninius bituminių rišiklių reologinius parametrus, charakterizuojančius modelius ir nustatė, kad skirtumai tarp modelių yra labai maži, tačiau Sigmoidinis ir Richards modeliai parodė geriausią koreliaciją tarp išmatuotų ir prognozuotų kompleksinio šlyties modulio G^* .

Šlyties modulio vertėms pertvarkyti į Sigmoidinę, Richardso ar kito modelio kompleksines kreives taikomas redukuotasis dažnis (arba laikas). Redukuotasis dažnis apskaičiuojamas pagal formulę 1.24 (Nilsson *et al.* 2004):

$$\log(f_R) = \log(f \cdot a_T), \quad (1.24)$$

čia f_R arba ω_R – redukuotas dažnis pagal referencinę temperatūrą, -; f arba ω – nustatytas dažnis prie temperatūros T , Hz arba rad/s; a_T – perslinkimo koeficientas temperatūrai T .

Šio redukuoto dažnio koeficientui nustatyti gali būti taikomi skirtingi perslinkimo metodai: vizualinis (nesuvaržytas), įvedant perslinkimo koeficientą (*angl. shift factor*) bei optimizuojant atstumus tarp izotermių.

Vizualinis kompleksinio modulio izotermių perslinkimas į vieną kreivę rankiniu būdu į vizualiai tolygią kreivę be temperatūros ir perslinkimo koeficientų sąryšių. Kadangi perslinkimo koeficientas a_T taip pat turi kvadratinės funkcijos priklausomybę nuo temperatūros (Rowe *et al.* 2011), todėl moksliniams skaičiavimams vizualinis perslinkimas retai taikomas.

Perslinkimo koeficientas a_T gali būti apskaičiuojamas pagal Williams-Landel-Ferry (WLF, 1.25) (Williams *et al.* 1955), patobulintą Kaelble (Kaelble 1985) (1.26) arba Arrhenius (Francken *et al.* 1988) (1.27 ir 1.28) formules:

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})}, \quad (1.25)$$

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T - T_{ref})}{C_2 + |T - T_{ref}|}, \quad (1.26)$$

$$\log(a_T) = C \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_{ref}} \right), \quad (1.27)$$

$$C = \frac{\Delta E_a}{2,303 \cdot R_g}, \quad (1.28)$$

čia T – temperatūra bandymo metu, K; T_{ref} – referencinė temperatūra, K; a_T – E* perslinkimo koeficientas iš temperatūros T į T_{ref} ; C_1, C_2, C – empiriniai koeficientai; ΔE_a – tariama aktyvioji energija; R_g – universali dujinės būsenos konstanta, $R_g = 8,314 \text{ J/K} \cdot \text{mol}$.

Dobson (1969) taikė WLF perslinkimo koeficiento formulę ir asfalto mišinių temperatūros priklausomybės charakterizavimui ir nustatė, jog taikytini skirtingi C_1 ir C_2 žemoms ir aukštomis temperatūroms. Dobson (1969) nustatė aukštomis temperatūroms $C_1 = 12,5$ ir $C_2 = 142,5$, tačiau šie koeficientai netikslūs esant žemesnei nei 20°C temperatūrai. Maccarone (1987) taip pat taikė WLF formulę ir pasiūlė taikyti apytiksles koeficientų vertes $C_1 = 23$ ir $C_2 = 230$.

Optimizacinis atstumų tarp izotermių metodas, dar vadinamas Gordon-Shaw metodu, kuriuo izotermių perslinkimas atliekamas etapais mažinant izotermių persidengimo paklaidą iki pakankamo tikslumo (Gordon *et al.* 1994; Rowe *et al.* 2009).

Kompleksinės kreivės modelių (funkcijos) kintamieji kartu su perslinkimo koeficientu apskaičiuojami minimizuojant standartinę kvadratinės paklaidos sumą (*angl. standard sum of square error SSSE*, formulė 1.29) tarp išmatuotų ir apskaičiuotų modulių. Dažniausiai taikant EXCEL Solver arba kitą skaičiuojamąjį paketą Matlab arba Matlab, turintį netiesės optimizacijos funkciją.

$$SSSE = \sum \frac{(\log G_{(calc.)}^*(\omega_R, T) - \log G_{(meas.)}^*(\omega, T))^2}{(\log G_{(meas.)}^*(\omega, T))^2}. \quad (1.29)$$

Kompleksinės kreivės modelio (funkcijos) pritaikymo tinkamumas įvertinamas pagal determinacijos koeficientą (R^2) ir santykinę standartinę paklaidą (S_e/S_y) apskaičiuojamus pagal 1.30 ir 1.31 formules:

$$R^2 = 1 - \frac{(n-v)}{(n-1)} \left(\frac{S_e}{S_y} \right)^2, \quad (1.30)$$

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum SSE^2}{(n-v)}}, \quad (1.31)$$

čia R^2 – determinacijos arba koreliacijos koeficientas; n – imties dydis, vnt.; v – funkcijos kintamųjų skaičius, vnt.; S_e – skaičiavimo standartinė paklaida; S_y – nustatytų verčių standartinis nuokrypis; $\sum SSE$ – kvadratinės paklaidos suma (*angl. sum of square error*), kai $SSE = (G_{(calc)}^* - G_{(meas)}^*)^2$.

NCHRP projekto 547 (2005) metu kompleksinės kreivės funkcijos pritaikymo tinkamumo rodikliai R^2 ir S_e/S_y suskirstyti į penkis kriterijus pateikti lentelėje 1.4. Šie kriterijai, kaip ir pati metodika, plačiai taikomi kitų mokslininkų (Forough *et al.* 2014; Nur *et al.* 2011; Choi *et al.* 2014) bitumo reologinėms savybėms charakterizuoti.

1.4 lentelė. Kompleksinės kreivės funkcijos pritaikymo tinkamumo kriterijai (Witczak 2005)

Table 1.4. The criteria of mastercurve function fitting goodness (Witczak 2005)

Funkcijos pritaikymo tinkamumo kriterijus	R^2	S_e/S_y
Puikus	$\geq 0,90$	$\leq 0,35$
Geras	$0,70 - 0,89$	$0,36 - 0,55$
Vidutinis	$0,40 - 0,69$	$0,56 - 0,75$
Prastas	$0,20 - 0,39$	$0,76 - 0,89$
Labai prastas	$\leq 0,19$	$\geq 0,90$

1.3.2.4. Asfalto mišinių mechaninių savybių prognozavimo modelių analizė

Asfalto mišinio mechaninių savybių nustatymo bandymai imlūs laikui, todėl šių savybių apskaičiavimo modeliai aktualūs iki šių dienų. Šių modelių taikymas leidžia pakankamai tiksliai apskaičiuoti asfalto mišinio dinaminį tamprumo modulį pagal asfalto mišinio granulimetrinę sudėtį, oro tuštymių kiekį, bitumo kiekį ir bitumo mechanines savybes.

Viena pirmųjų asfalto mišinio tampumo modulio prognozavimo regresijos formulių taikant bitumo standumą publikuota Heukelom ir Klomp (Heukelom 1966). Pagal Heukelom ir Klomp modelį 1969 m. išvesta Asfalto instituto (toliau – AI) asfalto mišinio kompleksinės kreivės funkcija atsižvelgiant į ciklinio

gniūždymo bandymų rezultatus prie 5–40 °C temperatūrų, įvertinant bitumo klampą ir granulimetrinę sudėtį (Shook *et al.* 1969).

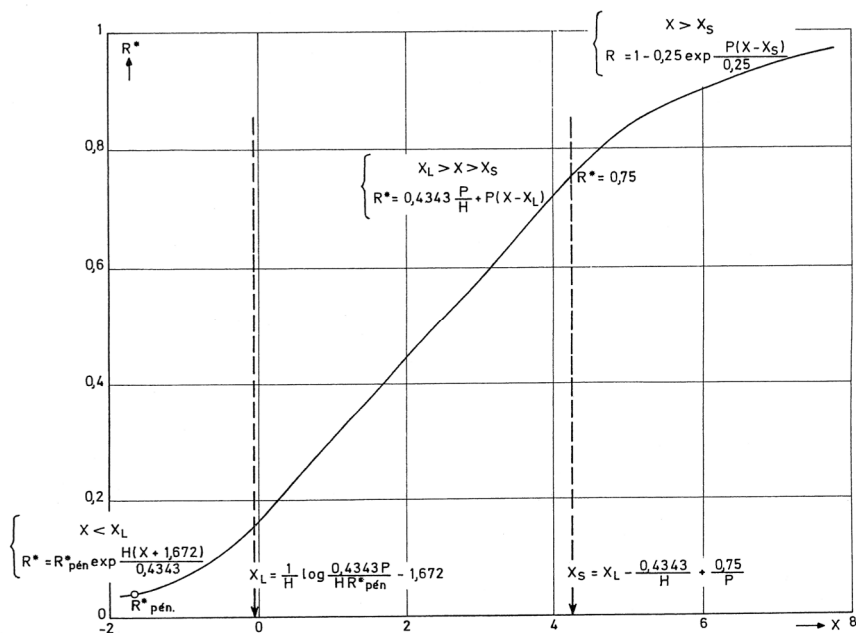
Francken *et al.* (1974) publikavo asfalto mišinių kompleksinės kreivės skaičiavimo algoritmą. Francken *et al.* (1974) dar kitaip vaidinamas BRRC modelis, iki šiol taikomas Europoje (Blab *et al.* 2006; FGSV 498 2009). BRRC modelis taikomas nemodifikuotiems bitumams, taikant formulę 1.32:

$$|E| = R^* \cdot E_\infty, \text{ kai } 0 < R^* < 1, \quad (1.32)$$

$$E_\infty = 1,436 \cdot 10^4 \cdot U^{0,56} \cdot e^{-0,0584 \cdot V_m}, \quad (1.33)$$

$$U = \frac{V_A}{B}, \text{ kai } 0,12 < U < 12,0, \quad (1.34)$$

čia E_∞ – trapumo (*angl. glassy*) modulis; R^* – koeficientas įvertinantis bitumo mechanines savybes, apskaičiuojamas pagal redukcijos funkciją įvertinant bitumo adatos penetraciją $P_{\text{pen}25}$ (mm⁻¹), minkštėjimo temperatūra (°C) ir priimant temperatūrą ir dažnį (1.14 pav.); V_A – mineralinių medžiagų kiekis, %; B – bitumo kiekis, %; V_m – oro tuštymų kiekis, kai 1,5% < V_m < 32,0%, %.



1.14 pav. R^* koeficiento funkcijos grafikas
Fig. 1.14. Representation of reduced modulus R^*

Hirsch modelis (Hirsch 1969) pagrįstas mišinių dėsniu (*anlg. the law (rule) of mixtures*), kuris plačiai taikomu kompozitinių medžiagų savybių prognozavimui, sukurtas betono arba cementiniams mišiniams apjungia dviejų fazių lygiagrečius (1.35) ir eilute (1.36) konvertuotus elementus į vieną modulį (1.37). Schematinė Hirsch (kompozitinio) modelio reprezentacija asfalto mišiniams pateikta 1.15 paveiksle.

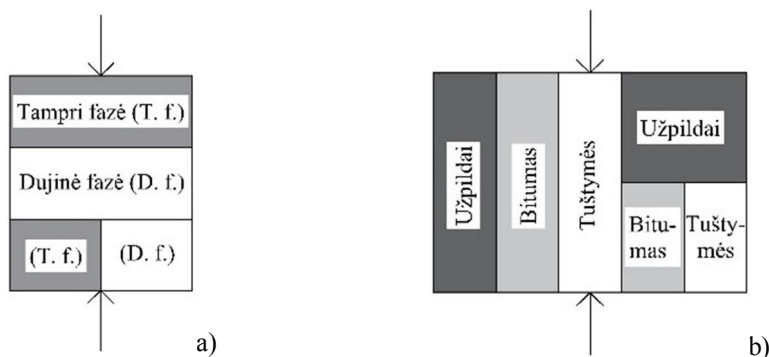
$$E_C = v_1 E_1 + v_2 E_2, \quad (1.35)$$

$$\frac{1}{E_C} = \frac{v_1}{E_1} + \frac{v_2}{E_2}, \quad (1.36)$$

$$\frac{1}{E_C} = (1+x) \left(\frac{v_1}{E_1} + \frac{v_2}{E_2} \right) + x \left(\frac{1}{v_1 E_1 + v_2 E_2} \right), \quad (1.37)$$

čia E_C – kompozitinės medžiagos tampumo (elastic) modulis; $v_{1,2}$ – komponentinės medžiagos masės dalis kompozite; $E_{1,2}$ – komponentinės medžiagos tampumo modulis; x – komponentinių medžiagų fazių (lygiagrečiai ir eilute) santykis kompozite.

Hirsch modelis modifikuotas ir taikytas NCHRP 567 projekte (Christensen *et al.* 2006) siekiant nustatyti ir įvertinti asfalto mišinio komponentų sudėties įtaką mišinio mechaninėms savybėms. Christensen *et al.* (2003) apžvelgė įvairias Hirsch modelio versijas ir pateikė modifikuotą modelį asfalto mišinio tampumo moduliui apskaičiuoti.



1.15 pav. Schematinė Hirsch modelio reprezentacija: a) originalus Hirsch modelis (Hirsch 1969); b) modifikuotas Hirsch modelis asfalto mišiniams (Christensen *et al.* 2003)

Fig. 1.15. The schematic representation of Hirsch model: a) original Hirsch model (Hirsch 1969); b) modified Hirsch model for asphalt mixtures (Christensen *et al.* 2003)

Asfalto mišinysje komponentinių medžiagų fazių santykis kinta priklausomai nuo temperatūros: esant aukštomis temperatūroms mišinysje didesnę poveikį turi eilutėje esančių komponentų būvis, o žemoms – lygiagrečiai (Pellinen *et al.* 2007). Šis santykio skirtumas įvertintas per užpildo kontakto kiekį P_c (*angl. aggregate contact volume*), kuris reprezentuoja užpildų tarpusavio kontakto proporciją vienas kito atžvilgiu.

Norint modeliuoti tampriai klampių medžiagų elgseną, fazių santykis turi turėti laiko ir temperatūros priklausomybę. Christensen *et al.* (2003) publikavo P_c kaip asfalto mišinio tūrinės sudėties (VMA ir VFB) ir bituminio rišiklio šlyties modulio G^* funkciją. Modifikuotas Hirsch modelis pateiktas 1.38 ir 1.39 formulėse.

$$\begin{aligned} |E^*|_{mix} = & P_c \cdot \left(E_a \cdot \left(1 - \frac{VMA}{100} \right) + 3 |G_b^*| \cdot \left(\frac{VFA \cdot VMA}{10000} \right) \right) + \\ & + (1 - P_c) \cdot \left(\frac{1 - \frac{VMA}{100}}{E_a} + \frac{VMA}{3 \cdot VFA |G_b^*|} \right)^{-1}, \end{aligned} \quad (1.38)$$

$$P_c = \frac{\left(P_0 + \frac{VFA \cdot |G_b^*|}{VMA} \right)^{P_1}}{P_2 + \left(\frac{VFA \cdot 3 |G_b^*|}{VMA} \right)^{P_1}}, \quad (1.39)$$

$$\varphi = -9,5(\log P_c)^2 - 39 \cdot \log P_c + 9,6, \quad (1.40)$$

čia P_c – mineralinių užpildų kontakto kiekis; E_a – mineralinių užpildų tampumo modulis, psi^2 ; VMA – mineralinių užpildų oro tuštymų kiekis, %; VFA – oro tuštymų kiekis užpildytas bituminiu rišikliu, %; $|G_b^*|$ – bitumo kompleksinio šlyties modulis, psi ; P_0, P_1, P_2 – modelio pritaikymo koeficientai; φ – fazės kampas tarp įtempimų ir deformacijų.

Modifikuotas Hirsch modelis pagrįstas eksperimentinių bandymų rezultatais iš 18-os asfalto mišinių bei taikant mažiausių kvadratų metodą (*angl. the least-squares procedure*) nustatyti koeficientai, užtikrinę mažiausią paklaidą (Christensen *et al.* 2003): $E_a = 4200000$, $P_0 = 20$, $P_1 = 0,58$, $P_2 = 650$.

AI modelis asfalto mišinio kompleksinės kreivės prognozavimui toliau buvo tobulinamas (Fonseca *et al.* 1996; Andrei *et al.* 1999; Witczak *et al.* 2000; Witczak). Andrei-Witczak (1999) modelis sukurtas vertinant bitumo klampą. Bitumo klampumas tai fizikinė savybė, kurioje nėra apkrovos ir dažnio, todėl šiuolaikiniuose modeliuose taikomas kompleksinis šlyties modulis nustatytas su DSR. Tačiau Andrei-Witczak (1999) modelis panaudotas 2004 m. MEPDG pritaikius Witczak-Bonaquist G^* modelį (Bonaquist *et al.* 1998) bitumo klampos prognozavimo iš kompleksinio šlyties modulio bandymo duomenų modelį 1.41:

$$\begin{aligned} \log|E^*| = & -1,249937 + 0,029232P_{200} - 0,001767(P_{200})^2 - 0,002841P_4 - \\ & - 0,058097V_a - 0,802208\left(\frac{V_B}{V_B + V_a}\right) + \\ & + \frac{3,871977 - 0,0021P_4 + 0,003958P_{38} - 0,00017P(P_{38})^2 + 0,005470P_{34}}{1 + e^{(-0,603313 - 0,31335 \log f - 0,39353 \log \eta)}}, \end{aligned} \quad (1.41)$$

$$\eta = \frac{|G_b^*|}{\omega} \left(\frac{1}{\sin \varphi_b} \right)^{a_0 + a_1 \omega + a_2 \omega^2}, \quad (1.42)$$

$$\text{kai } \omega = 10 \text{ rad/s} \rightarrow \eta = \frac{|G_b^*|}{10} \left(\frac{1}{\sin \varphi_b} \right)^{4,8628}, \quad (1.43)$$

čia $|E^*|$ – kompleksinis modulis, 10^5 psi; V_a – oro tuštymių kiekis, %; V_B – bitumo kiekis, %; f – apkrovos dažnis, Hz; $P_{34}, P_{38}, P_4, P_{200}$ – mineralinių medžiagų granulometrinė sudėties procentas ant sietų atitinkamai 19 mm, 9,5 mm, 4,75 mm ir 0,75 mm; η – bituminio rišiklio klampa, 10^6 Poise; $|G^*|$ – kompleksinis šlyties modulis, Pa; ω – kampinis dažnis, rad/s; φ_b – bitumo fazės kampas, °; a_0, a_1, a_2 – funkcijos pritaikymo koeficientai (atitinkamai 3,63922, 0,13137 ir -0,77054).

Andrei-Witczak (1999) modelis taip pat pritaikytas Pietų Korėjos dangų konstrukcijų projektavimo metodikoje (Cho *et al.* 2010).

Bari *et al.* (2007) patikslino Andrei-Witczak (1999) modelį įvertindamas didesnę asfalto mišinių imtį bei patobulino tiesiogiai įvedant bitumo kompleksinio šlyties modulio ir fazės kampo vertes. Bari ir Witczak (2007) asfalto mišinio prognozavimo modelis 1.44:

$$\begin{aligned}
\log|E^*| = & -0,349 + 0,754 \cdot \left(|G_b^*|^{-0,0052} \right) \cdot \\
& \cdot \left(6,65 - 0,032\rho_{200} + 0,0027\rho_{200}^2 + 0,011\rho_4 - 0,0001\rho_4^2 + \right. \\
& \cdot \left. 0,006\rho_{38} - 0,00014\rho_{38}^2 - 0,08 \cdot V_a - 1,06 \cdot \left(\frac{V_B}{V_a + V_B} \right) \right) + \\
& + \frac{2,56 + 0,03 \cdot V_a + 0,71 \cdot \left(\frac{V_B}{V_a + V_B} \right) + 0,012\rho_{38} - 0,0001\rho_{38}^2 - 0,01\rho_{34}}{1 + e^{(-0,7814 - 0,5785 \log|G_b^*| + 0,8834 \log \delta_b)}}.
\end{aligned} \tag{1.44}$$

Huet-Sayegh modelis (Huet 1963; Huet 1999; Sayegh 1965), skirtas asfalto mišinio dinaminio tamprumo ir bitumo šlyties modulių mechaninei elgsenai prognozuoti. Huet-Sayegh modelis yra konceptualiai panašus į medžiagų reologinius modelius (1.16 pav. a).

Modelis sudarytas iš dviejų tamprių elementų esančių lygiagrečiai dviem paraboliniams elementams, kurie priklauso nuo temperatūros. Modelis sudarytas kontinuumo spektre tiksliai prognozuoja tiek bituminio rišiklio, tiek ir asfalto mišinių tiesiškai tampriai klampų būvį mažose deformacijose bet kurioje temperatūroje ir dažnyje (Di Benedetto *et al.* 2004).

Huet-Sayegh modelis pritaikytas Prancūzijos dangų konstrukcijų analizės programoje VisoRoute: 2.0 (Duhamel *et al.* 2005; Chabot *et al.* 2010; Chupin *et al.* 2012). Huet-Sayegh modelio kompleksinio modulio funkcija dažnio domene aprašoma 1.45 formule:

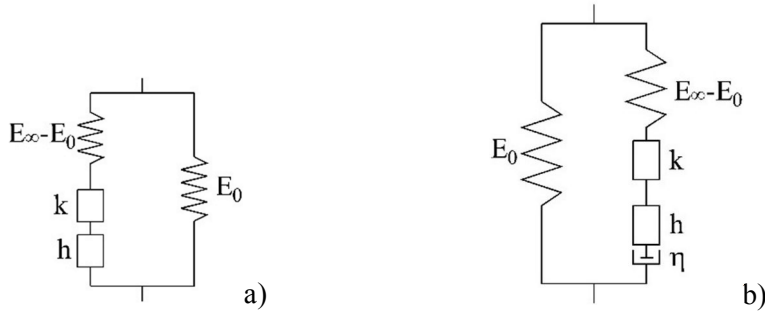
$$E^* = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau(\theta))^{-k} + (i\omega\tau(\theta))^{-h}}, \tag{1.45}$$

$$\tau(\theta) = e^{A_0 + A_1\theta + A_2\theta^2}, \tag{1.46}$$

čia E_0 – statinis (*angl. static*) modulis, kai $\omega \rightarrow 0$; E_∞ – trapumo (*angl. glassy*) modulis, kai $\omega \rightarrow \infty$; i – kompleksinis skaičius, $i^2 = -1$; ω – kampinis dažnis, $\omega = 2\pi f$; f – dažnis, Hz; h, k – eksponentės, kai $1 > h > k > 0$; δ – bedimensė konstanta; τ – laiko parametras; A_0, A_1, A_2 – konstantos koeficientai.

Olard *et al.* (2003), Olard *et al.* (2003) ir Di Benedetto *et al.* (2004) patobulino Huet-Sayegh modelį įvertindami kompleksinės kreivės perslinkimo koefi-

cientą WLF (Williams *et al.* 1955) ir klampą, mokslinėje literatūroje patobulintas Huet-Sayegh modelis žinomas kaip 2S2P1D modelis (1.16 pav. b).



1.16 pav. Reologiniai Huet-Sayegh (a) ir 2S2P1D (b) modeliai

Fig. 1.16. Schematic of Huet-Sayegh (a) and 2S2P1D (b) rheological model

Asfalto mišinio ar bituminio rišiklio modulių kompleksinės kreivės 2S2P1D modelis, sudarytas iš septynių elementų (1.17 pav.) 1.47 formulės:

$$E^*(i\omega\tau) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}}, \quad (1.47)$$

$$\eta = (E_0 - E_\infty) \cdot \beta\tau, \quad (1.48)$$

$$\tau(T) = a_T(T) \cdot \tau_0 \quad \text{arba} \quad a_T = \frac{\tau}{\tau_0}, \quad (1.49)$$

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T - T_r)}{C_2 + (T - T_r)}, \quad (1.50)$$

čia h, k – eksponentės apibrėžiančios parabolines kreivės galų lietinių kampus, kai $1 > h > k > 0$; δ – bedimencė konstanta apibrėžianti parabolines kreivės formą; β – parametras nustatytas iš Newtono klampos η formulės (1.48) ir laiko parametro τ , priklausančio nuo kompleksinės kreivės perslinkimo koeficiento a_T iš formulės (1.50). Nustatyta, kad prognozuojant bituminio rišiklio kompleksinę kreivę taikant 2S2P1D modelį E_∞ visais atvejais lygus 0.

Nesurišti mineralinių medžiagų mišiniai ir gruntai dangos konstrukcijoje atlieka pagrindo sluoksnių funkciją, kurios paskirtis – apkrovos išskirstymas. Nesurištų mineralinių medžiagų ir gruntų laikomoji geba – tai dalelių karkaso pasipriešinimas (atsparumas) šlyčiai, kuris priklauso nuo visos eilės kintamųjų (Vaitkus 2007). Esant nepakankamai visos struktūros laikomajai gebai ženkliai sumažėja dangos konstrukcijos eksploatacinis laikotarpis, o dangoje susidaro struktūrinių provėžų ir nuovargio plyšių. Projektavimo metu svarbu įvertinti sezoninius hidroterminio režimo svyravimus, kurie turi didžiausią įtaką nesurištų pagrindo sluoksnių mechaniniam funkcionavimui ir dangos konstrukcijos reakcijai į apkrovą. Sezoninių ir hidrologinių sąlygų svyravimų poveikis dangos konstrukcijai sumažinamas stabilizuojant žemės sankasos gruntus arba atskiriant sluoksnius geotekstile bei sutvirtinant geotinklu (Vaitkus *et al.* 2007; Vaitkus 2010; Vaitkus *et al.* 2014).

Didžioji dalis dangos konstrukcijų projektavimo metodų paremti empiriniais duomenimis apie nesurištų pagrindo sluoksnių ir žemės sankasos gruntų funkcionavimą. Prie empirinių metodų priskiriami AASHTO ir SHELL Kalifornijos laikomosios gebos CBR bandymo metodu pagrįsti projektavimo gidai. Taip pat ir dangos konstrukcijų projektavimo metodai, kurie skaičiavimams taiko deformacijos modulio (dinaminio štampos) E_{v2} vertes, priskiriami prie empirinių duomenų.

Hveem 1950 metais pirmą kartą pristatė atsistatymo savybes kaip apibrėžiančias nesurištų mineralinių medžiagų tampųjį būvį. Seed, Chan, ir Lee (1962) pristatė atsistatymo modulį, kaip žemės sankasos gruntų tampriosios reakciją, bei jo sąryšį su nestandžios dangos konstrukcijos nuovargiu. Nesurištos mineralinės medžiagos reakcija į apkrovą nėra visiškai tampri, o po kiekvieno užkrovimo susidaro liekamųjų deformacijų. Nesurištų pagrindo sluoksnių ir žemės sankasos gruntų atsistatymo modulis priklauso nuo kelių faktorių: tankio, drėgmės kiekio, smulkiųjų dalelių kiekio, granulimetrinės sudėties, medžiagos rūšies, apkrovų skaičiaus ir dažnio, įtempimų lygio bei įtempimų eigos (Attia *et al.* 2011; Bilodeau *et al.* 2012; Ekblad *et al.* 2006; Lekarp *et al.* 1998; Ghabchi *et al.* 2013). Mokslininkai įrodė, kad atsistatymo modulis didėja didėjant šoniniam ir deviatoriniam slėgiui (Brown, 1974; Hicks ir Monismith, 1971; Lekarp *et al.*, 2000b; Rada ir Witczak, 1981). Teigiama, kad šios bandymo sąlygos su šoniniu slėgiu yra artimiausios žemės sankasos funkcionavimui, todėl atsistatymo modulis taikomas MEPDG dangų konstrukcijų projektavimui.

Nesurištų pagrindo sluoksnių mechaninės savybės nėra šio tyrimo dalis, todėl šių sluoksnių tamprumo ir atsistatymo moduliai dangos konstrukcijos modeliavimui parinkti pagal medžiagos rūšį ir kitų mokslininkų publikuotus rezultatus (Nowamooz *et al.* 2011; Nowamooz *et al.* 2013; Ho *et al.* 2014; Ekblad *et al.* 2008; Cerni *et al.* 2012; Cerni *et al.* 2015).

1.4. Automobilių kelių dangų konstravimo įvesties duomenų poreikis ir reikšmingumas

Atlikus užsienio šalyse taikomų dangų projektavimo metodų analizę (1.1 skyrelyje) nustatyta, kad racionaliam dangos konstrukcijos projektinio sprendinio suradimui reikia patikimų įvesties duomenų apie aplinkos ir klimato, pagrindo laikomosios gebos (struktūrinio stiprumo), ir apkrovų sąlygas, pagal kurias sukuriama arba parenkama racionaliausia medžiaga ir jų sluoksnių storiai.

Standartizuotų dangos konstrukcijų taikymas pasiteisina tais atvejais, kai projektinė apkrova yra apkrovos intervalų viduryje. Pažangus dangos konstrukcijos projektavimas įvertinant dangos konstrukcijos funkcionavimą neatsiejamas nuo kelių tiesybos medžiagų fizinių ir mechaninių savybių vertinimo ir funkcionavimo prognozavimo. Toks dangos konstrukcijos skaičiavimo algoritmas įvertinant dangos konstrukcijos funkcionavimą pateiktas 1.18 paveiksle.

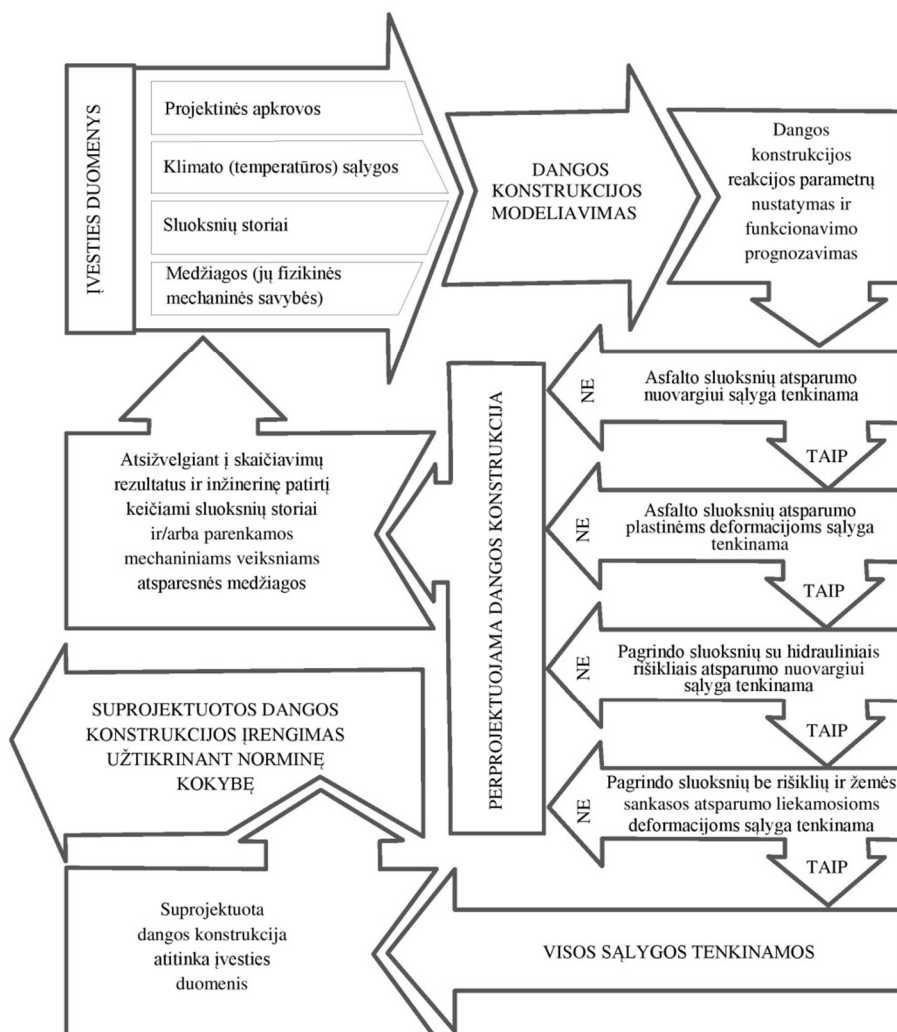
Detalus asfalto dangos konstrukcijų projektavimas paremtas dangos konstrukcijos reakcijos į apkrovą ir funkcionavimo analize, turi būti taikomas visais atvejais projektuojant ir tiesiant magistralinės reikšmės kelius. Taikant Vokietijos gerąją asfalto dangų konstrukcijų projektavimo praktiką 2013–2015 metais atlikta nemažai analitinių ir eksperimentinių tyrimų įvesties duomenims nustatyti (Vaitkus *et al.* 2015).

1.4.1. Aplinkos sąlygos ir klimatas

Asfalto dangos konstrukcijos laikomąją gebą ženkliai veikia temperatūra. Temperatūra dangos konstrukcijoje pasiskirsto netiesiškai (Žiliūtė *et al.* 2016; Graczyk *et al.* 2014). Žinant, dangos paviršiaus temperatūrą galima apskaičiuoti temperatūrą bet kuriame dangos konstrukcijos gylyje taikant (Speth 1985; Hess 1998) metodą pagal 1.51 formulę ir 1.5 lentelę. Teorinis temperatūros kitimas asfalto sluoksniuose pateiktas 1.19 paveiksle.

$$y = b \cdot \ln(0,01 \cdot x + 1,0) + T, \quad (1.51)$$

čia y – temperatūra asfalto sluoksnio gylyje x , °C; x – gylis, kuriame norima nustatyti temperatūrą, mm; T – dangos paviršiaus temperatūra, °C; b – parametras priklausantis nuo dangos paviršiaus temperatūros, parenkamas iš 1.5 lentelės.



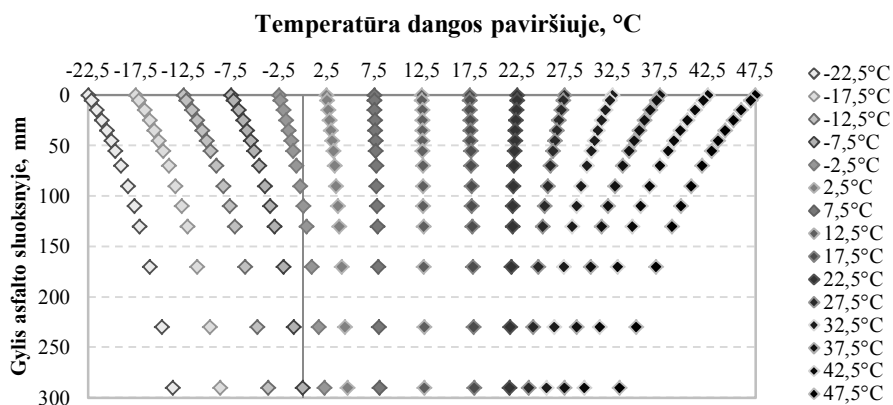
1.18 pav. Dangos konstrukcijos skaičiavimo algoritmas įvertinant dangos konstrukcijos funkcionavimą (FGSV 498 2009; Vaitkus *et al.* 2015)

Fig. 1.18. The algorithm of pavement structure design evaluating performance of structure (FGSV 498 2009; Vaitkus *et al.* 2015)

Skaiciuojant dangos konstrukcijos reakciją į apkrovą, temperatūra bei jos kitimas dangoje įvertinami per asfalto mišinio prie atitinkamos temperatūros tamprumo modulį, nustatytą ir apskaičiuotą iš eksperimentinių bandymų.

1.5 lentelė. Koeficientas b pagal dangos paviršiaus temperatūrą (FGSV 498 2009)
Table 1.5. The coefficient b under pavement surface temperature (FGSV 498 2009)

Temperatūra, °C	<-10	<-5	<0	<5	<10	<15	<20	<25	<30	<35	<40	<45
Parametras b	6,5	4,5	2,5	0,7	0,1	0,3	0,4	-1,6	-4,0	-6,2	-8,5	-10,5



1.19 pav. Temperatūros kitimo asfalto dangos sluoksniuose priklausomybė nuo temperatūros dangos paviršiuje (FGSV 498 2009)

Fig. 1.19. Temperature variation in asphalt layers depending on surface temperature (FGSV 498 2009)

1.4.2. Automobilių transporto priemonių apkrovos

Dangos konstrukciją veikiančios transporto apkrovos įvertinamos dviem etapais (Kleizienė *et al.* 2015): 1) nustatoma suprojektuotos dangos konstrukcijos reakcija į rato apkrovą; 2) nustatomas apskaičiuotos apkrovos intensyvumas (pasi-kartojimo dažnis, skaičius) per projektinį laikotarpį.

Suprojektuotos dangos konstrukcijos reakcijos į rato apkrovą nustatymui svarbu kuo tiksliau įvertinti: vidutinį automobilių važiavimo greitį, transporto priemonės tipą, didžiausią svorį, bendrosios masės pasiskirstymą ant ašių, ašių skaičių, slėgi padangose, padangos ir dangos kontakto plotą. Skaiciuojant dangos konstrukcijos reakciją į apkrovą transporto priemonių važiavimo greitis įvertinamas per asfalto mišinio prie tam tikro dažnio nustatytą dinaminį tamprumo modulį.

Nustačius charakteringiausių transporto priemonių apkrovos pasiskirstymą ant ašių apskaičiuojama vieno rato slėgis į dangą pagal 1.52 formulę:

$$p_i = \frac{P_i}{S_i}, \quad (1.52)$$

čia p_i – charakteringosios transporto priemonės i rato slėgis į dangą, MPa; P_i – charakteringosios transporto priemonės i rato apkrova, N; S_i – charakteringosios transporto priemonės i rato kontakto plotas, mm².

Kontakto plotas priklauso nuo padangos tipo ir slėgio padangoje, kuriuos sudėtinga nustatyti projekcinėje stadijoje, todėl projektavimo tikslais, priimamas (Vaitkus *et al.* 2015) apskritimo formos rato kontakto plotas su 150 mm² spinduliu. Taigi, projektuojamai dangos konstrukcijai apskaičiuojami reakcijos parametrai (įtempiai, deformacijos ir įlinkiai kritiniuose dangos konstrukcijos taškuose, 1.3.1 poskyryje) susidarantys veikiant p_i slėgiui į dangą. Taikant nuovargio ir liekamųjų deformacijų funkcijas (1.2.2, 1.2.3 ir 1.2.4 poskyriuose) nustatomas ribinis apkrovos intensyvumas konkrečioms dangos konstrukcijos funkcionavimo savybėms įvertinti.

Remiantis Minerio hipoteze (1.1 formulę 1.2.1 poskyryje) dangos konstrukcija turi būti suprojektuota taip, kad projektinis apkrovos intensyvumas (skaičius) visais atvejais bus mažesnis už ribinį apkrovų intensyvumą (skaičių), o šių apkrovos intensyvumų santykių suma neviršys 1. Tuo tikslu nustatomas charakteringosios transporto priemonės i -osios apkrovos intensyvumas per projekcinį laikotarpį (1.53 formulė).

Transporto priemonių apkrovų poveikio dangos konstrukcijai įvesties duomenys tiesiogiai susiję su nustatytu projektiniu laikotarpiu. Projektinis laikotarpis yra teorinis dangos eksploatacijos periodas, kuris gali sutrumpėti arba pailgėti dėl pasikeitusių aplinkos, įrengimo kokybės, apkrovos kintamųjų. Dažniausiai priimamas 20 metų projektinis laikotarpis, praėjus šiam terminui bus atliekama dangos rekonstrukcija. Projektinis i -osios apkrovos klasės operacijų skaičius prie j -ajam temperatūros intervalui N_{i-j}^{pr} apskaičiuojamas pagal 1.53 formulę (FGSV 498 2009):

$$N_{i-j}^{pr} = N \cdot 365 \cdot A_i \cdot T_j, \quad (1.53)$$

čia N – projektinis laikotarpis, metais; A_i – vidutinis i -osios apkrovos (arba charakteringosios transporto priemonės) intensyvumas; T_j – j -ojo temperatūros intervalo pasikartojimo dažnis, %.

Transporto srauto ašių apkrovos kelių tinkle ir procentinis ašių svorių pasiskirstymas turi būti nustatyti iš svėrimo postų eisme (*angl. Weight in motion stations* – WIM) duomenų (Andriejauskas *et al.* 2013; Zofka *et al.* 2014; Kleizienė *et al.* 2015).

1.4.3. Dangos konstrukcijos sluoksnių medžiagų savybės

Atsižvelgiant į aplinkos sąlygas, transporto priemonių apkrovų intensyvumą ir žemės sankasos gruntų savybės projektuojami dangos konstrukcijos sluoksnių storiai parenkant sluoksnių medžiagas.

Dangos konstrukcijos reakcijos parametrų apskaičiavimui reikia įvertinti tamprias arba tampriai klampias medžiagos savybes atlikus bandymus (1.3.2 poskyrį). Nesant galimybių kelių tiesybos medžiagų tyrimams dalį savybių galima priimti pagal 1.6 lentelėje pateiktus duomenis.

Xu *et al.* (2008) tyrimo metu taikė Puasono koeficiento vertes: asfalto sluoksniui – 0,35, pagrindo sluoksniui – 0,35, nesurištam pagrindo sluoksniui – 0,30 ir žemės sankasai – 0,45.

1.6 lentelė. Teoriniai dangos konstrukcijos sluoksnių medžiagų tampumo moduliai (Sveinsdóttir 2011)

Table 1.6. The theoretic elastic modulus of pavement layers materials (Sveinsdóttir 2011)

Dangos konstrukcijos sluoksnio medžiaga	Tamprumo modulis, MPa	Puasono koeficientas (ν), -
Nauja asfalto danga (nėra nuovargio požymių) prie 0 °C	13500–35000	0,25–0,30
Nauja asfalto danga (nėra nuovargio požymių) prie 20 °C	2000–3500	0,30–0,35
Nauja asfalto danga (nėra nuovargio požymių) prie 60 °C	150–350	0,35–0,45
Naujas betonas (nėra plyšių ar kitų irimo požymių)	20000–35000	0,15
Granito arba žvyro skaldos pagrindas (be priemaišų, su puikiomis drenažo savybėmis)	150–600	0,35–0,45
Žvyro pagrindas (be priemaišų, su puikiomis drenažo savybėmis)	70–400	0,35
Žvyro pagrindas (be priemaišų, su prastomis drenažo savybėmis)	20–100	0,40
Naujas hidrauliniais rišikliais surištas pagrindas (nėra plyšių ar kitų irimo požymių)	3500–13500	0,20
Ekspluatuotas hidrauliniais rišikliais surištas pagrindas (su plyšiais ir kitais irimo požymiais)	300–1400	0,30

1.6 lentelės pabaiga

Dangos konstrukcijos sluoksnio medžiaga	Tamprumo modulis, MPa	Puasono koeficientas (ν), -
Žemės sankasa stabilizuota hidrauliniais rišikliais (cementu)	350–3500	0,20
Žemės sankasa stabilizuota kalkėmis	150–1000	0,20
Žemės sankasa iš žvyro arba smėlingo grunto	70–400	0,40
Žemės sankasa iš dulkingo grunto	35–150	0,42
Žemės sankasa iš molingo grunto	20–80	0,42
Nešvarus, drėgnas, prastai drenuojantis gruntas	10–40	0,45–0,50

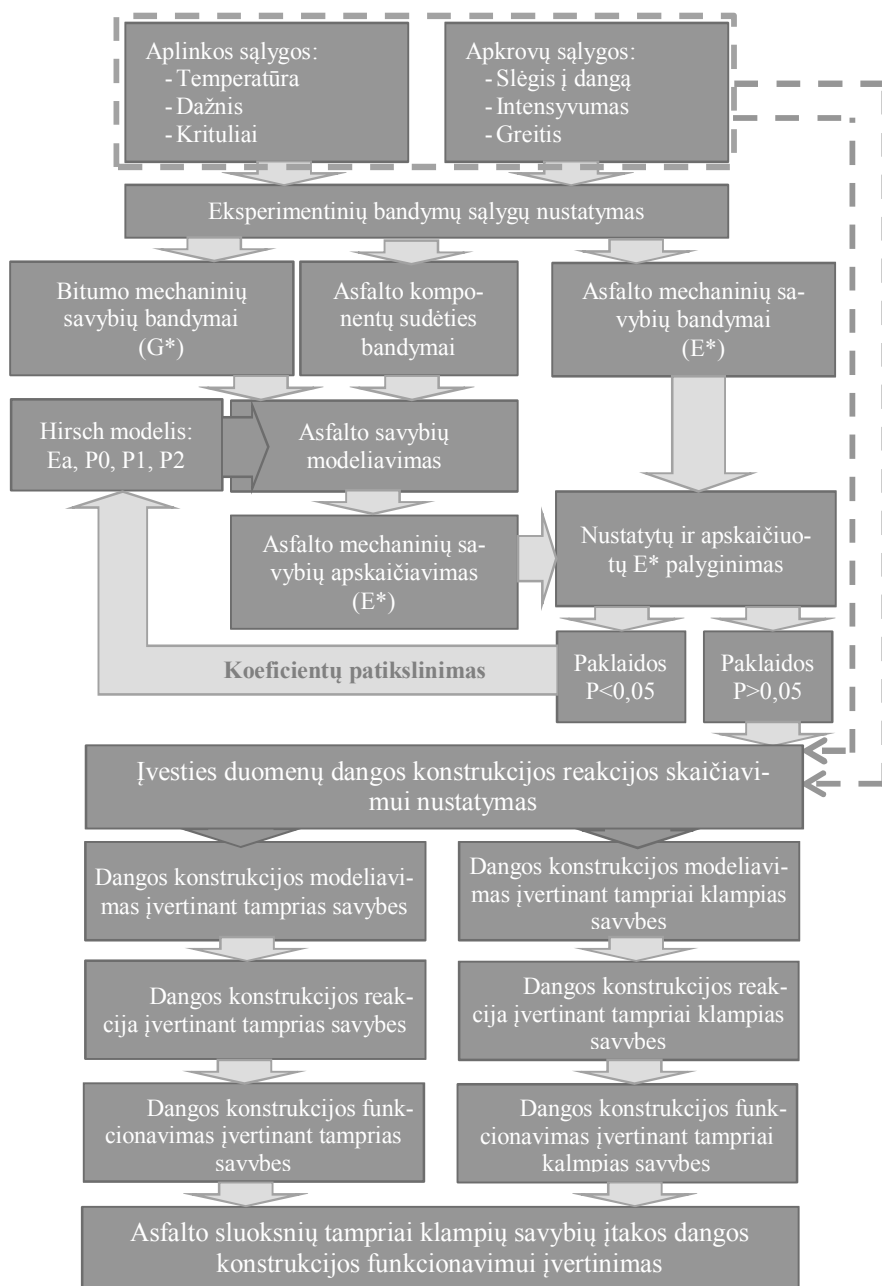
1.4.4. Modelis asfalto sluoksnių tampriai klampių savybių poveikio dangos konstrukcijos funkcionavimo įvertinimui

Atsižvelgiant į atliktą literatūros analizę sudarytas asfalto dangos konstrukcijos funkcionavimo modelis tampriai klampių savybių įtakos įvertinimui. Analizei pasirinktos dvi dangos konstrukcijos siekiant įvertinti tampriai klampių savybių įtaką dangos konstrukcijos funkcionavimui naujai projektuojamai ir 8 metus eksploatuojamai dangos konstrukcijoms.

Tampriai klampių savybių vertinimo modelio algoritmas sudarytas pagal žemiau pateiktą eiliškumą:

1. Atlikti asfalto mišinių ir jų komponentų medžiagų eksperimentiniai bandymai.
2. Nustatyti tamprųjų ir tampriai klampių savybes iš eksperimentinių duomenų bei pritaikant Hirsch modelį.
3. Įvertinti apskaičiuotas ir išmatuotas savybes bei pritaikyti/sukalibruoti Hirsch modelį.
4. Apskaičiuoti dangos konstrukcijos funkcionavimą taikant tamprias ir tampriai klampias savybes.
5. Ekonomiškai pagrįsti tampriai klampių savybių vertinimą projektuojant dangos konstrukcijas.

Asfalto dangos konstrukcijos funkcionavimo modelis tampriai klampių savybių įtakos įvertinimui pateiktas 1.20 paveiksle.



1.20 pav. Asfalto sluoksnių tampriai klampių savybių įtakos dangos konstrukcijos funkcionavimui nustatymo teorinis modelis

Fig. 1.20. The theoretical model of asphalt viscoelastic properties influence to pavement performance determination

1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

Apibendrinant pirmajame skyriuje pateiktą nestandžios dangos konstrukcijos skaičiavimo ir kelių tiesybės medžiagų fizikinių ir mechaninių savybių metodų ir modelių analizę, galima teigti:

1. Iki šiol Lietuvoje asfalto dangos konstrukcijų projektavimas buvo atliekamas parenkant sluoksnių storius ir medžiagas iš standartizuotų dangų konstrukcijų katalogo pagal bendrą ekvivalentinių 10 t svorio ašių skaičių. Toks metodas neįvertina dangos konstrukcijos funkcionavimo, t. y. atsparumo nuovargiui ir liekamosioms deformacijoms. Norint taikyti pažangius dangos konstrukcijos projektavimo metodus būtinas sluoksnių medžiagų mechaninių savybių tyrimas.
2. Asfalto mišinių mechaninės savybės gali būti apskaičiuojamos pagal asfalto mišinių sudėtį ir bitumo klampumą arba dinaminį šlyties modulį. Daugeliu atvejų dinaminio tamprumo modulio apskaičiavimo modeliai pagrįsti ciklinio gniuždymo bandymais, kurio taikymas ėminių iš eksploatuojamos kelio dangos tyrimui ribotas. Netiesioginis ciklinio tempimo bandymas gali būti sėkmingai pritaikytas tiek naujai suformuotų asfalto sluoksnių, tiek ir išgręžtų iš eksploatuojamo kelio asfalto sluoksnių tyrimams.
3. Nors asfalto sluoksnių dinaminio tamprumo modulio prognozavimas pagal mišinio sudėtį taikomas užsienio šalyse. Tačiau asfalto mišiniams su vietinėmis medžiagomis tokie analitinių modelių taikymo tyrimai iki šiol nebuvo atlikti. Visų teorinių modelių taikymas turi būti patikslintas ir tikrintas eksperimentiniais tyrimais.
4. Tiriant bitumą ar asfalto mišinius dinaminio šlyties ar tamprumo modulio nustatymo bandymai turi būti atlikti medžiagos tiesiškai tampriai klampiose būvyje. Tokiu atveju, galima daryti prielaidą, kad bitumas arba asfalto mišinys elgsis kaip termologiškai paprasta medžiaga, kuriai galioja laiko-temperatūros superpozicijos principas.
5. Nustačius asfalto mišinių dinaminio tamprumo modulio kompleksinę kreivę prie referencinės temperatūros galima apskaičiuoti modulį prie bet kurio apkrovos dažnio ar laiko ir temperatūros tiesiškai tampriai klampiose ribose.

Atsižvelgiant į mokslinės literatūros analizės išvadas, asfalto sluoksnių tampriai klampių savybių poveikio nestandžios dangos konstrukcijos funkcionavimui nustatymo modelio pagrindimui būtina išspręsti šiuos uždavinius:

1. Atrinkti, išanalizuoti ir susisteminti mokslinių tyrimų rezultatus, susijusius su asfalto dangos konstrukcijos reakcijos į apkrovą modeliaavimu, asfalto mišinių tampriai klampių bei nesurištų sluoksnių tamprių savybių nustatymu ir dangos konstrukcijos funkcionavimo prognozavimu.
2. Ištirti naujus, sendintus ir iš eksploatuojamo kelio dangos paimtus asfalto mišinius bei nustatyti fizikines ir mechanines savybes. Nustatyti dinaminį tamprumo ir šlyties modulius asfalto mišiniams ir bitumams, bei taikant suprepozicijos principą sudaryti kompleksines kreives.
3. Apskaičiuoti asfalto mišinių dinaminį tamprumo modulį taikant bitumo dinaminį šlyties modulį ir mišinio sudėties duomenis. Pritaikyti Hirsch modelį asfalto mišinių dinaminio tamprumo modulio ir jo kompleksinės kreivės sudarymui.
4. Nustatyti tamprias ir tampriai klampias savybes apibrėžiančių modelių pritaikymo parametrus asfalto dangos konstrukcijos reakcijos į apkrovą skaičiavimams.
5. Apskaičiuoti naujų ir sendintų asfalto sluoksnių tampriai klampių savybių poveikį dangos konstrukcijos reakcijai ir funkcionavimui, kai tamprios asfalto mišinio savybės vertinamos temperatūrinuose režimuose ir vidutinėje temperatūroje.
6. Apskaičiuoti bei įvertinti skirtingais metodais projektuojamų asfalto dangos konstrukcijų ekonominį efektyvumą.
7. Pateikti rekomendacijas asfalto mišinių tampriai klampioms savybėms nustatyti, duomenų analizei bei nestandžios dangos konstrukcijų projektavimui.

Asfalto tampriai klampių savybių nustatymo eksperimentinis tyrimas

Nestandžios dangos konstrukcijos reakciją į apkrovas ir funkcionavimą didžiaja dalimi nulemia asfalto dangos sluoksnio savybės, todėl eksperimentinis tyrimas orientuotas į asfalto mišinių fizikinių ir mechaninių savybių nustatymą. Šiame skyriuje aprašytas asfalto sluoksnių eksperimentinis tyrimo planas bei taikyti bandymo metodai. Pateikti bandymų rezultatai bei atlikta duomenų analizė ir jų vertinimas.

Eksperimentiniam tyrimui pasirinkti septyni asfalto mišiniai. Trys mišiniai paimti iš 8-erių metų eksploatuojamo eksperimentinio dangų bandomojo ruožo, kuris įrengtas 2007 metais. Kiti keturi mišiniai pagaminti 2015 metais. Visi mišiniai tirti vienodomis eksperimentinėmis sąlygomis. Asfalto mišinių dinaminio tamprumo modulio kitimas priklausomai nuo apkrovos dažnio ir temperatūros, kuris nustatytas dviem būdais: tiriant sutankinto asfalto mišinio savybes ir apskaičiuojant asfalto mišinio savybes Hirsch modeliu pagal mišinio fizikines ir bitumo mechanines savybes. Iš eksperimento tyrimo rezultatų ir atliktos analizės nustatyti asfalto sluoksnių tamprių ir tampriai klampių savybių parametrai dangos konstrukcijos reakcijos į apkrovą skaičiavimams.

Skyriaus tematika paskelbti straipsniai: Vaitkus *et al.* (2012).

2.1. Asfalto mišinių fizikinių ir mechaninių savybių eksperimentinis tyrimas

Remiantis atlikta kitų mokslininkų tyrimų analize galima teigti, jog žinant bitumo dinaminį šlyties modulį galima apskaičiuoti asfalto mišinio dinaminį tampumo modulį. Tuo tikslu dažniausiai taikomi Witczak, Hirsch, 2S2P1D, Francken ir Verstreten modeliai (Francken *et al.* 1974; Pellinen *et al.* 2007). Atsižvelgiant į modelio universalumą, praktiškumą ir tikslumą pasirinktas Hirsch modelis (1.3.2.4 poskyris). Šio modelio taikymo dinaminio tampumo modulio skaičiavimo pagrindimui atlikti netiesioginio tempimo dinaminiai bandymai su Lietuvoje gaminamais ir naudojamais asfalto mišiniais. Eksperimentinio tyrimo tikslas – nustatyti asfalto sluoksnių savybes apibrėžiančias tamprųjų ir tampių klampių būvius bei įvesties duomenis, būtinus dangos konstrukcijos modeliavimui ir funkcionavimo analizei.

Eksperimentas atliktas asfalto viršutinio, apatinio ir pagrindo sluoksnių mišiniais, naujai pagamintiems ir paimtiems iš bandomojo ruožo kelio dangos konstrukcijos. Tai 7-nių asfalto mišinių ir jų sudedamųjų dalių bei bitumo savybių tyrimas (tyrimo planas pateiktas 2.2.1 poskyryje) bei Hirsch modelio taikymo galimybių analizė. Skyriuje aprašyti bandymo metodai, rezultatų analizė ir vertinimas taikyti asfalto mišinių mechanines savybes apibrėžiantiems tampriojo ir tampių klampiojo būvių parametrų nustatymui.

2.1.1. Tyrimo planas

Dangos konstrukcijos funkcionavimas neatsiejamas nuo eksploatacinių sąlygų, todėl analizuojant duomenis svarbu žinoti: dangos paviršiaus temperatūrą, drėgnį, sunkiojo transporto eismo intensyvumą, dangos konstrukcijos įlinkį ir jo kitimą. VGTU APF Kelių tyrimo institutas atlieka ilgalaikius tyrinėjimo darbus ir dangos eksploatacinių savybių monitoringą 2007 m. Vilniaus raj. Pagirių gyvenvietės Kalno g. įrengtame bandomajame ruože (Čygas *et al.* 2008; Vaitkus *et al.* 2012; Čygas *et al.* 2015). Todėl disertacijos eksperimentam tyrimui parinkti šio bandomojo ruožo dangos konstrukcijų asfalto mišiniai ir tos pačios rūšies naujai pagaminti asfalto mišiniai. Disertacijoje tiriama, modeliuojama ir analizuojama Pagirių bandomojo ruožo 12-ta dangos konstrukcija, nes tos pačios rūšies kelių tiesybos medžiagos plačiausiai taikomos kitų dangos konstrukcijų įrengimui (Vaitkus *et al.* 2015).

Eksperimentas atliktas 7-niems asfalto viršutiniams, apatiniams ir pagrindo sluoksnių mišiniais, iš jų trys išgretinti iš Pagirių bandomojo ruožo 11-tos ir 12-tos dangos konstrukcijų (2.1 pav.) ir keturi 2015 m pagaminti asfalto gamykloje.

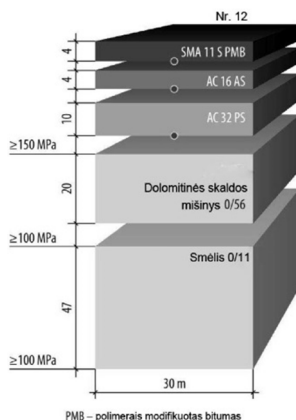
Bandomojo ruožo eksploatacijos metu (nuo 2007 iki 2015 metų) bendras ekvivalentinių 10 t svorio ašių skaičius siekė 0,6 mln. (Žiliūtė *et al.* 2016). Eksp-

loatacijos metu nustatyta, didžiausia asfalto dangos paviršiaus temperatūra siekė +51 °C, žemiausia -19 °C.

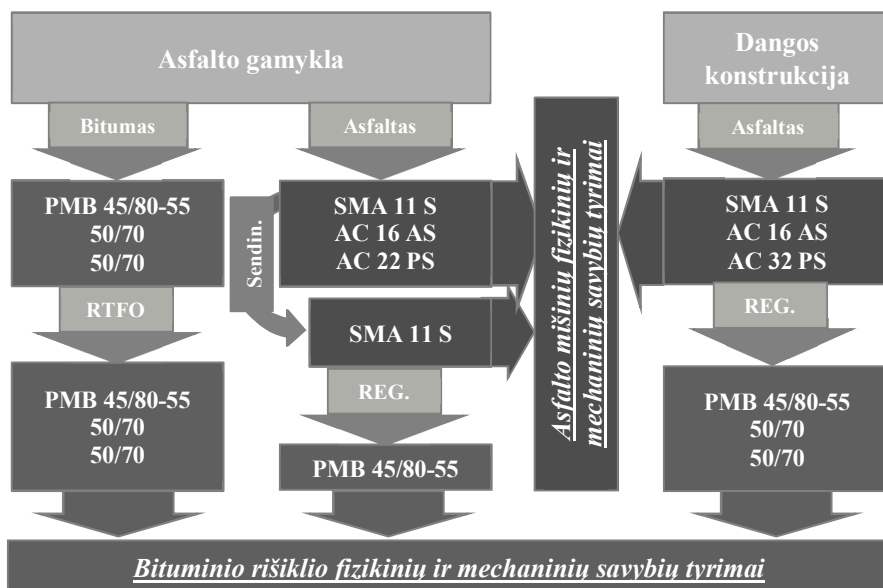
Siekiant nustatyti asfalto sluoksnių tampriai klampių savybių įtaką dangos konstrukcijos funkcionavimui eksperimentu ištirtos asfalto mišinių ir jų sudėtinų medžiagų fizikinės ir mechaninės savybės. Eksperimento tyrimo schema asfalto mišinių ir bituminių rišiklių bandymams pateikta 2.2 paveiksle. Asfalto mišinių ir bituminių rišiklių specifikacija pateikta 2.4 lentelėje. Eksperimentinio tyrimo metu atlikti bandymai:

- Bituminio rišiklio fizikinių savybių tyrimai:
 - Bituminio rišiklio adatos penetracija prie 5 °C, 15 °C, 25 °C ir 35 °C temperatūrų pagal LST EN 1426:2007.
 - Bituminio rišiklio minkštėjimo temperatūra pagal LST EN 1427:2007. Bitumas ir bituminiai rišikliai. Minkštėjimo temperatūros nustatymas. Žiedo ir rutulio metodas.
 - Bituminio rišiklio atsparumas kietėjimui pagal LST EN 12607-1:2015. Bitumas ir bituminiai rišikliai. Atsparumo kietėjimui, veikiant šilumai ir orui, nustatymas. 1 Dalis. RTFOT metodas.
- Asfalto mišinių fizikinių savybių tyrimai:
 - Rišiklio kiekis mišinyje pagal LST EN 12697-1:2012. Bituminiai mišiniai. Karštojo asfalto mišinio bandymo metodai. 1 dalis. Tirpiojo rišiklio kiekis.
 - Mišinio tariamasis tankis pagal LST EN 12697-6:2012. Bituminiai mišiniai. Karštojo asfalto mišinio bandymo metodai. 6 dalis. Bituminių bandinių tariamojo tankio nustatymas.
 - Mišinio didžiausias tankis pagal LST EN 12697-5:2012.
 - Oro tuštymių kiekis pagal LST EN 12697-8:2003. Bituminiai mišiniai. Karštojo asfalto mišinio bandymo metodai. 8 dalis. Bituminių bandinių tuštymėtumo rodiklių nustatymas.
 - Mineralinių medžiagų granulimetrinė sudėtis pagal LST EN 12697-2+A1:2007. Bituminiai mišiniai. Bandymo metodai. 2 dalis. Granulometrinės sudėties nustatymas.
- Bituminio rišiklio mechaninių savybių tyrimai:
 - Bituminio rišiklio tiesiškai tampriai klampaus būvio nustatymas pagal 2.2.2. poskyryje aprašytą metodiką.
 - Bituminio rišiklio dinaminio šlyties modulio nustatymas pagal LST EN 14770:2012. Bitumas ir bituminiai rišikliai. Kompleksinio šlyties modulio ir fazės kampo nustatymas. Dinaminis šlyties roemetras (DSR) ir AASHTO T315 2013: 33.
- Asfalto mišinių mechaninių savybių tyrimai:
 - Tiesiškai tampriai klampaus būvio nustatymas pagal 2.2.2. poskyryje aprašytą metodiką.

- Dinaminio tamprumo modulio nustatymas pagal LST EN 12697-26:2012. Bituminiai mišiniai. Karštojo asfalto mišinio bandymo metodai. 26 dalis. Standis.



2.1 pav. Tiriamos bandomo ruožo dangos konstrukcijos (Nr. 12) schema
Fig. 2.1. The pavement structure (No. 12) of Experimental road section



2.2 pav. Eksperimento tyrimo schema asfalto mišinių ir bitumo bandymams
Fig. 2.2. The flow chart of experimental research of asphalt mixtures and bitumen tests

2.1 lentelė. Asfalto mišinių ir bitumo specifikacija

Table 2.1. The specification of asphalt mixtures and bituminous binders

Specifikacijos charakteristika	Savybės ir žymėjimas						
Asfalto mišinių rūšis	SMA	AC	AC	SMA	SMA	AC	AC
Mineralinių medžiagų viršutinio sieto akutės dydis, mm	11	16	22	11	11	16	32
Asfalto mišinio paskirtis	V	A	P	V	V	A	P
Asfalto mišinių apkrova	S	S	S	S	S	S	S
Asfalto mišinio kodas	01-P-N	02-B-N	03-B-N	04-P-S	05-P-B	06-B-B	07-B-B
Bitumo kodas	01-P-A	02-B-A	03-B-A	04-P-R	05-P-R	06-B-R	07-B-R
Mišinio gamybos metai	2015	2015	2015	2015	2007	2007	2007
Bitumo rūšis	PMB 45/80-55	50/70	50/70	PMB 45/80-55	PMB 45/80-55	50/70	50/70
Asfalto mišinio sendinimas	N ¹	N ¹	N ¹	S ²	R ³	R ³	R ³
Bitumo būseną	RTFOT	RTFOT	RTFOT	Regeneruotas	Regeneruotas	Regeneruotas	Regeneruotas
Deklaruota penetracija	52	61	61	52	54	54	54
Deklaruota minkštėjimo temperatūra	60,5	49,3	49,3	60,5	68,9	50,9	50,9
Deklaruotas bitumo kiekis	-	4,20	3,80	-	7,00	4,90	4,20
Mineralinių medžiagų karkaso rūšis	G	G	ŽV	G	G	G	D

¹ Naujas asfalto mišinys, kuriame įvykęs trumpalaikio sendinimo procesas įvyko maišymo gamykloje metu.

² Eksperimento metu sendintas asfalto mišinys, kuriam imituotas ilgos trukmės senėjimo procesas pagal 2.1.2. poskyryje pateiktą procedūrą.

³ Realiomis sąlygomis sendintas asfalto mišinys, kuris buvo eksploatuojamas natūraliomis eksploatacinėmis sąlygomis iš Pagirių bandomajame ruože. G, ŽV ir D atitinkamai granito, žvirgždo ir dolomito skaldos užpildai.

2.1.2. Tyrimo metodika

2.1.2.1. Paruošiamieji darbai

Asfalto mišinio SMA 11 S ilgalaikio senėjimo eksperimentinė metodika. Asfalto mišiniui (iš asfalto gamyklos) SMA 11 S su bitumu PMB 45/80-55 taikomas nestandartizuotas ilgalaikio senėjimo metodas laboratorinėmis sąlygomis. Ilgalaikio senėjimo (*angl. Long-term aging*) asfalto mišinio sendinimo eksperimentinė metodika sudaryta remiantis (Van der Bergh 2011; Braham *et al.* 2009) atliktais tyrimais bei pateiktomis rekomendacijomis. Nesutankintas asfalto mišinys homogeniškai paskleidžiamas inde sudarant iki 6 cm storio sluoksnį. Prieš pradėdant sendinimo procedūrą mišinys atvėsinaamas iki 100 °C temperatūros. Ilgos trukmės asfalto mišinio sendinimas atliktas esant 100 °C temperatūrai kaitinant mišinį 48 h krosnelėje su priverstine oro cirkuliacija, ir kas 10–12 h permaišant mišinį.

Dangos konstrukcijos šurfavimas ir asfalto bandinių formavimas. Eksperimento metu bandomi asfalto gamykloje pagaminti nauji mišiniai, laboratorinėmis ir natūraliomis sąlygomis sendinti mišiniai.

Natūraliomis sąlygomis sendinti asfalto viršutinio sluoksnio mišinio bandiniai išgręžti cilindrinio grąžtu iš Pagirių bandomo ruožo 11 ir 12 konstrukcijų, apatinio – 10 ir 12, pagrindo – 6, 15 ir 19 konstrukcijų.

Asfalto gamykloje pagaminti nauji mišiniai ir laboratorijoje sendintas mišinys 1 h pakaitinti iki +150 °C temperatūroje ir sutankinti voliniu tankintuvu (2.3 pav. a) suformuojant 410 x 260 x 80/100 mm plokštes.



a)



b)

2.3 pav. Asfalto mišinių bandinių paruošimas: a) plokštės formavimas voliniu tankintuvu; b) išgręžti bandiniai

Fig. 2.3. The sample preparation of asphalt mixtures: a) compaction with roller compactor; b) cored asphalt samples

Plokštės formuotos išlaikant eksperimentiniame ruože nustatytus dangos konstrukcijos sluoksnių tankius:

- asfalto viršutinis sluoksnis SMA 11 S (01-P-N ir 04-P-S) – $2,394 \text{ Mg/m}^3$;
- asfalto apatinis sluoksnis AS 16 AS (02-B-N) – $2,457 \text{ Mg/m}^3$;
- asfalto pagrindo sluoksnis AC 22 PS (03-B-N) – $2,352 \text{ Mg/m}^3$.

Asfalto mišiniams, kurių didžiausias frakcijos dydis iki 16 mm, suformuoti $40 \pm 2 \text{ mm}$ aukščio ir $100 \pm 3 \text{ mm}$ diametro bandiniai (2.3 pav. b). Mišiniams, kurių frakcija didesnė nei 16 mm, suformuoti $60 \pm 2 \text{ mm}$ aukščio ir $150 \pm 3 \text{ mm}$ diametro bandiniai.

Bitumo regeneravimas sukiuoju garintuvu. Eksperimento metu sendinto asfalto mišinio ir asfalto mišinių, paimtų iš bandomojo ruožo, regeneruotas bandymams reikalingas bituminio rišiklio kiekis pagal LST EN 12697-3:2013 ir LST EN 12697-1:2012 standartų reikalavimus. Nesutankintas asfalto mišinys laikytas 8–9 valandas bitumo tirpiklyje – toluene. Ištirpusio bitumo ir mineralinių medžiagų mišinys atskiriamas šaltojo ekstrahavimo prietaisu. Toluene ištirpintas bitumas regeneruojamas sukiuoju garintuvu (2.4 pav.), kuriame aukšto slėgio ir temperatūros kombinacija išgarina tolueną. Atlikus bitumo regeneravimą formuojami P_{pen} , $T_{\text{R\&B}}$ ir DSR bandymų bandiniai.



2.4 pav. Bitumo regeneravimas sukiuoju garintuvu

Fig. 2.4. Recovery of bitumen binder with rotary evaporator

Bitumo savybių pasikeitimas dėl aukštos temperatūros asfalto gamybos procese įvertinamas sendinant bitumą trumpos trukmės sendinimo (RTFOT) metu pagal LST EN 12607-1:2015. Bitumas, paimtas iš asfalto gamyklos saugyklų, pasendintas trumpalaikio sendinimo RTFOT metodu. Bandymas atliktas prie $157 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ palaikant pastovų $4,0 \pm 0,2 \text{ l/min}$ oro tiekimą į bandinius $75 \pm 1 \text{ min}$. Po RTFOT bandymo nustatomas bituminio rišiklio masės pokytis, su sendintu bitumu formuojami P_{pen} , $T_{\text{R\&B}}$ ir DSR bandymų bandiniai.

2.1.2.2. Bitumo fizikinių savybių nustatymas

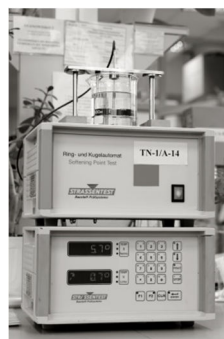
Bituminiams rišikliams atliktas adatos penetracijos (P_{pen}) bandymas pagal (LST EN 1426 2007) standarto reikalavimus prie skirtingų temperatūrų 5 °C, 15 °C, 25 °C ir 35 °C (2.5 pav. a). Bandiniai suformuoti pakaitinus bitumą po RTFOT ir regeneravimo procedūrų pilant į 100 ml ir 50 ml indelius. Prieš bandymą bandiniai 1 h laikyti bandymo temperatūroje. Bandymai atlikti su automatinio adatos penetracijos prietaisu, nustatant adatos įsmigimo gylį 4–5 kartus.

Bituminiams rišikliams atliktas minkštėjimo temperatūros nustatymas ($T_{R\&B}$) pagal (LST EN 1427 2007) standarto reikalavimus (2.5 pav. b). Bandiniai suformuoti pakaitinus bitumą po RTFOT ir regeneravimo procedūrų pilant į du standartinio dydžio žiedus. Atvėsus bandiniams iki kambario temperatūros bandiniai kondicionuoti 30 min < 5 °C temperatūroje. Paruošti bitumo bandiniai metaliniuose žieduose dedami į dviejų lygių stovą ant bandinio viršaus dedamas standartinio dydžio ir svorio rutulys. Stovas su bandiniais nardinami į 5 ± 1 °C vandens indą, kuris kaitinamas pastoviu 5 °C/min greičiu, kol rutulys deformuojantis bitumui pasiekia apatinę rėmo plokštelę. Nustatoma temperatūra prie kurios pasiekta ribinė deformacija.

Bituminių rišiklių fizikinių savybių bandymų rezultatai pateikti 2.3.1. poskyryje.



a)



b)

2.5 pav. Bituminio rišiklio fizikinių savybių tyrimas: a) adatos penetracijos bandymas; b) minkštėjimo temperatūros bandymas

Fig. 2.5. The physical properties determination of bitumen binders: a) needle penetration test; b) softening point temperature test

2.1.2.3. Asfalto mišinio fizikinių savybių nustatymas

Bitumo kiekis ir mineralinių medžiagų granulometrinė sudėtis mišinyje. Asfalto mišiniams rišiklio kiekis nustatytas pagal (LST EN 12697-1 2012) standarto reikalavimus ekstrahuojant bitumą karštuoju būdu. Mineralinės medžiagos ir

rišiklio atskyrimas atliktas automatiniu ekstrahavimo prietaisu su trichloretileno tirpikliu. Rišiklio kiekis nustatomas atimant masių skirtumą prieš ekstrahavimą ir po bandymo išdžiovinus mineralines medžiagas. Po bitumo ekstrahavimo nustatyta mineralinių medžiagų granulimetrinė sudėtis pagal (LST EN 12697-2+A1 2007) standarto reikalavimus sijoiant ir sveriant masės likutį.

Mišinio tariamasis tankis. Asfalto mišiniams tariamasis tankis nustatytas pagal LST EN 12697-6 2012 standarto reikalavimus. Iš asfalto mišinių suformuoti 3 bandiniai Maršalo tankinimo metodu. Kiekvienam bandiniui su oro tuštymėmis vienetinė tūrio masė nustatyta kai bandinys prisotintas vandens ir nusausintu paviršiumi pagal LST EN 12697-6 2012 9.3. punktą. Pirmiausiai nustatyta sauso bandinio masė, bandinys nardinamas į 25 °C temperatūros vandens vonelę, kurioje laikomas 30 min–3 h. Nustatoma prisotinto vandeniui bandinio masė sveriant vandenyje ir nusausintu paviršiumi bandinio masė sveriant ore. Tariamasis tankis apskaičiuojamas pagal standarto 10.2 punktą 0,001 Mg/m³ tikslumu.

Tariamasis tankis pagal bandinio matmenis pagal standarto 9.5 punktą nustatytas ir apskaičiuotas pagal standarto 10.4 punkto visiems asfalto mišinių cilindriniams bandiniams.

Mišinio didžiausias tankis. Asfalto mišiniams didžiausias tankis nustatytas pagal LST EN 12697-5AC 2012 standarto 9.2 punkto reikalavimus. Asfalto mišinio be oro tuštymų vienetinė tūrio masė nustatyta tūrinio piknometro metodu.

Oro tuštymų ir mineralinės medžiagos rišikliu užpildytų tuštymų kiekis. Asfalto mišiniams oro tuštymų kiekis apskaičiuotas pagal LST EN 12697-8 2003) standarto 4.2 punktą. Mineralinės medžiagos rišikliu užpildytų tuštymų kiekis apskaičiuotas pagal standarto 5.2 punktą teigiant, kad vidutinis bituminio rišiklio tankis – 1,03 kg/m³ pagal (Nicholls 1998).

Asfalto mišinių fizinių savybių bandymų rezultatai pateikti 2.3.2. poskyryje.

2.1.2.4. Bitumo mechaninių savybių nustatymas

Dinaminiu šlyties reometru galima nustatyti įvairias bitumo reologines ir mechanines savybes prie skirtingų temperatūrų, apkrovos pobūdžio, įtempimų arba deformacijų, dažnio arba laiko sąlygų. Bitumo mechaninės savybės nustatytos HAAKE MARS 4.41 (2.6 pav. a) dinaminiu šlyties reometru (DSR) su temperatūros užtikrinimo elementais viršutinei ir apatinei plokštelėms.

Priklausomai nuo bitumo bandymo temperatūros skiriasi bandinio dydis ir plokštelės diametras. Prie aukštų temperatūrų (nuo 46 °C iki 82 °C), kai bitumo būvis plastiškas, reikia mažesnio sukio momento norint suteikti bandiniui fiksuotas deformacijas, todėl bandymai atliekami su 25 mm plokštele. Prie vidutinių temperatūrų (nuo 46 °C iki 10 °C), kai bitumo būvis tampa tampriai

klampus, reikia didesnio sukio momento norint fiksuoti deformacijas, todėl bandymai atliekami su 8 mm plokštele.

Pirmiausia su pasendintais arba regeneruotais bitumais suformuoti 8 mm ir 25 mm diametro ir apie 2–3 mm storio bandiniai, kurie 2–3 sav. kondicionuoti ne didesnėje kaip +5 °C temperatūroje. Prieš atliekant bandymus su DSR, nustatyta nulinė plokštelių pozicija prie vidutinės bandymo temperatūros. Bitumo bandinio ir plokštelių sukibimas užtikrintas pakeliant temperatūrą iki 60 °C prieš bandinio kirpimą. Bitumo bandinys kerpamas viršutinei plokštei nusileidus iki fiksuoto bandinio aukščio (1 mm arba 2 mm priklausomai nuo bandinio diametro) su įkaitinta mentele (2.6 pav. b).

Bitumo mechaninės savybės nustatytos atliekant du bandymus: tiesiškai tampriai klampaus (LVE) būvio sąlygų nustatymo bandymas, dinaminio šlyties modulio nustatymo bandymas.



2.6 pav. Bituminio rišiklio mechaninių savybių nustatymas su DSR
a) HAAKE MARS reometras; b) bandinys po bandinio apkirpimo

Fig. 2.6. Determination of bitumen binder mechanical properties with DSR: a) HAAKE MARS 4.41 rheometer; b) sample after cutting

Tiesiškai tampriai klampaus (LVE) būvio bandymo sąlygų nustatymas. Bituminiams rišikliams LVE riboms nustatyti atliktas pakopinis deformacijų bandymas (*angl. strain sweep test*) arba kitaip osciliacinis sūkių laiko atžvilgiu (*angl. oscillation time sweep*) bandymas kontroliuojant deformacijas (*angl. control strain mode*).

Bitumo tiesiškai tampriai klampaus būvio bandymai atlikti prie didžiausio dinaminio šlyties modulio bandymo dažnio – 15,92 Hz (100 rad/s). LVE bandymas atliktas pakopomis palaipsniui didinant kampinės (šlyties) deformacijas nuo 0,05 % iki 51,2 %. Viena deformacijos pakopa – 10 s, tarp deformacijos pakopų nustatytos 2 s pertraukos medžiagai grįžti į pirminę būklę.

Kiekvienam bitumui LVE ribos nustatytos atliekant po 2 bandymus prie 10 °C ir 46 °C temperatūrų su 8 mm diametro bei prie 46 °C ir 82 °C temperatūrų su 25 mm diametro plokštelėmis. Bituminių rišiklių LVE būvio ribos nustatytos vertinant nustatytą šlyties modulio kitimo kreivę priklausomai nuo deformacijų bei reometro techninių galimybių.

Bandymo rezultatų duomenų analizė ir rezultatai pateikti 2.2.3. skyriuje.

Dinaminio šlyties modulio nustatymas. Bitumo dinaminiam šlyties moduliui nustatyti atliktas osciliacinis dažnio diapazono (*angl. oscillation frequency sweep*) bandymas kontroliuojant deformacijas prie 10–82 °C temperatūrų pagal LST EN 14770 (2012) ir AASHTO T315 (2013) standartų reikalavimus.

Dinaminio šlyties modulio nustatymo bandymai atlikti standartuose apibrėžtose temperatūrose su 8 mm plokšte nuo 46 °C iki 10 °C ir su 25 mm plokšte nuo 46 °C iki 82 °C. Temperatūra keičiama kas 6 °C siekiant užtikrinti, kad analizuojant duomenis termolinijos visiškai persidengtų.

Po kiekvieno temperatūros pokyčio, temperatūra sumažinama arba padidinama ne didesniu kaip 5 °C/min greičiu. Nusistovėjus kitai temperatūrai bandinys kondicionuojamas ne mažiau kaip 10 min, siekiant užtikrinti tolygias temperatūros sąlygas bandinyje. Vienoje temperatūroje prie deformacijų, kurios yra LVE ribose, atliekama 15 sūkių dažniuose nuo 15,85 Hz (100 rad/s) iki 0,159 Hz (1 rad/s) be pauzių. Bandymo metu taikytos fiksuotos deformacijų vertės, kurios apskaičiuotos tiesinės interpoliacijos metu pagal nustatytas LVE ribas.

Bitumo dinaminio šlyties modulio bandymų analizė ir rezultatai pateikti 2.2.3. skyriuje.

2.1.2.5. Asfalto mišinio mechaninių savybių nustatymas

Eksperimente asfalto mišiniai bandyti tampriame ir tampriai klampiam būviuose nustatant dinaminį tamprumo modulį netiesioginio tempimo bandymo metodu (2.7 pav. b). Šis bandymas atliktas Infratest 10 kN dinamine mašina su temperatūrą kontroliuojančia kamera apkraunant bandinius cikline apkrova prie skirtingų dažnių ir temperatūrų.

Horizontalios deformacijos matuotos LVDT davikliais privirtiniais rėmu, vertikaliosios – davikliu ant apkrovos pavaros svirties. Esant dinaminiam sinusoidiniam apkrovos pobūdžiui šis prietaisas bandiniui gali suteikti nuo 0,1 kN iki 10 kN jėgą.

Bandymai atlikti po 2–3 sav. nuo bandinių suformavimo užtikrinant tas pačias bandinių laikymo sąlygas (2.7 pav. a). Prieš kiekvieną bandymą asfalto bandiniai kondicionuoti išlaikant > 4 h bandymo temperatūroje.

Tiesiškai tampriai klampa (LVE) būvio bandymo sąlygų nustatymas. Sukurtos procedūros principas panašus į Al Sp Asphalt gaires (FGSV 430 2009), tačiau pritaikytas eksperimentui naudotos įrangos apkrovos ir duomenų įrašymo

galimybėms. LVE bandymai atlikti prie trijų temperatūrų, kontroliuojant apkrovą (*angl. stress control mode*), apkrovos pobūdis – haversinusoidinis su pastovia 0,03 kN kontakto apkrova. Bandymas atliktas esant 5 Hz dažniui prie 10 apkrovų etapų pradedant nuo 0,15 kN iki 9 kN. Viename apkrovos etape bandiniui suteikta 100 ciklų, atliekant skaičiavimus analizuoti paskutinių 10 ciklų vidurkiai.



2.7 pav. Asfalto mišinių mechaninių savybių tyrimas: a) bandinių kondicionavimas; b) netiesioginio tempimo bandymas

Fig. 2.7. Determination of asphalt mixtures mechanical properties:
a) Samples conditioning; b) IDT test preparation

Tiriamų asfalto mišinių tiesiškai tampriai klampus būvis nustatytas prie 4 °C, 22 °C ir 40 °C temperatūrų. Nustatant tamprumo modulio bandymo apkrovas vadovautasi dviem kriterijais: teoriniu – horizontaliųjų deformacijų ribos 0,05–0,3 %, techniniu – įrangos techninės galimybės.

Asfalto mišinių tampriai klampių dinaminio tamprumo modulio bandymo sąlygų nustatymo analizė ir rezultatai pateikti 2.2.3. poskyryje.

Dinaminio tamprumo modulis nustatytas pagal šiam tyrimui sukurtą procedūrą, kurios principas panašus į A1 Sp Asphalt gaires (FGSV 430 2009), tačiau pritaikytas eksperimentui naudotos įrangos apkrovos ir duomenų įrašymo galimybėms. Dinaminio tamprumo modulio bandymas atliktas prie penkių temperatūrų nuo 4 °C iki 34 °C (kas 6 °C), kontroliuojant apkrovą, apkrovos pobūdis – haversinusoidinis su pastovia 0,03 kN kontakto apkrova. Bandymas atliktas prie 0,1–7 Hz dažnių parenkant ribinę nustatytą LVE apkrovą – 100, 50 ir 20 ciklus priklausomai nuo dažnio.

Asfalto mišinių kompleksinio šlyties modulio bandymų analizė ir rezultatai pateikti 2.2.4. poskyryje.

2.2. Eksperimentinio tyrimo bandymo rezultatų analizė

2.2.1. Bitumo fizikinių savybių rezultatai

Tirtiems bitumams nustatyta penetracija prie 4-ių temperatūrų: 5 °C, 15 °C, 25 °C ir 35 °C, vidutinės 4–5 matavimų vertės pateiktos 2.2 lentelėje. Bituminių rišiklių minkštėjimo temperatūra nustatyta iš 2 matavimų, vidutinės vertės pateiktos 2.2 lentelėje. Nustatytos bituminių rišiklių penetracijos vertės palygintos su standartuose (LST EN 12591 2009; LST EN 14023 2011) apibrėžtomis vertėmis. Bituminių rišiklių adatos penetracijos ir minkštėjimo temperatūros pasiskirstymas pateikti atitinkamai 2.8 ir 2.9 paveiksluose.

2.2 lentelė. Bituminių rišiklių adatos penetracija ir minkštėjimo temperatūra

Table 2.2. Bitumen binders needle penetration and softening point

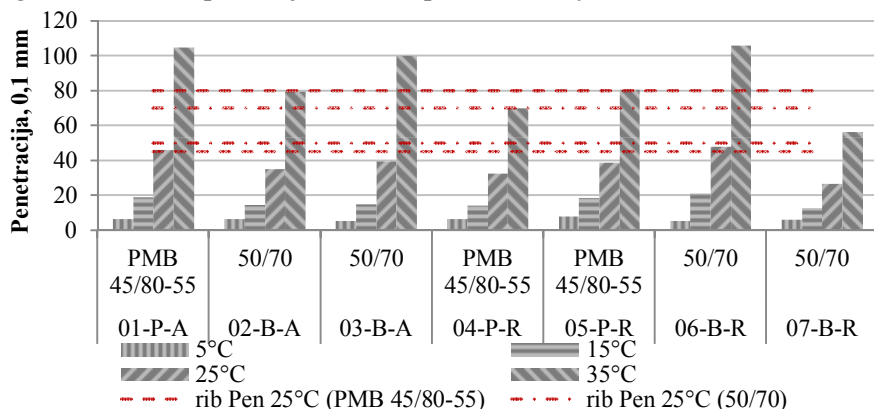
Kodas	Bituminis rišiklis	Sendinimo etapas	Penetracija, Pen 0,1 mm				$T_{R\&B}$, °C	I_p Pagal Pen 25 °C
			5 °C	15 °C	25 °C	35 °C		
01-P-A	PMB 45/80-55	RTFOT	7,0	19,4	46,6	105,3	69,6	2,58
02-B-A	50/70	RTFOT	6,8	15,0	35,5	80,0	57,0	-0,37
03-B-A	50/70	RTFOT	6,0	15,4	40,0	100,3	56,6	-0,20
04-P-R	PMB 45/80-55	Regeneruotas	7,0	14,6	32,8	70,3	68,3	1,53
05-P-R	PMB 45/80-55	Regeneruotas	8,3	19,0	39,3	81,0	69,6	2,16
06-B-R	50/70	Regeneruotas	6,0	21,6	48,3	106,3	58,8	0,70
07-B-R	50/70	Regeneruotas	6,5	13,0	27,0	57,0	64,9	0,54

Analizuojant bitumo adatos penetraciją prie 25 °C nustatyta, kad bitumas PMB 45/80-55 po RTFOT (01-P-A) tenkino standarto (LST EN 14023 2011) reikalavimus. Tačiau visų kitų bitumų penetracija prie 25 °C nustatyta nuo 3,4 % iki 46 % mažesnė lyginant nuo standarto intervalo. Vertinant adatos penetracijos rezultatus, matoma tendencija, jog regeneruoto bitumo vertė mažesnė nei tos pačios rūšies bitumo po trumpalaikio sendinimo.

Analizuojant bituminių rišiklių minkštėjimo temperatūrą nustatyta, kad nemodifikuoto 50/70 bituminio rišiklio vertės viršijo standarte (LST EN 12591 2009) apibrėžtas ribas. Nustatyta 6 % ir 17 % didesnė minkštėjimo temperatūra regeneruoto 50/70 bitumo iš apatinio ir pagrindo sluoksnių vertės lyginant su tos pačios rūšies bitumu po trumpalaikio sendinimo. Polimerais modifikuoto bitumo PMB 45/80-55 minkštėjimo temperatūra keitėsi nežymiai ir yra artima standarte LST EN 14023 2011 apibrėžtoms riboms.

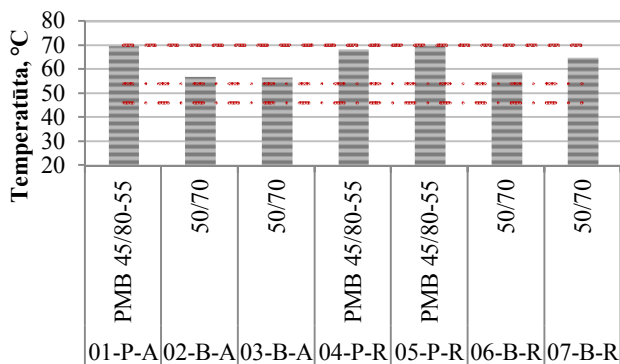
Nustatyto penetracijos indekso I_p rezultatai rodo, kad jautriausi žemų temperatūrų poveikiui yra bitumas PMB 45/80-55 po RTFOT (01-P-A) ir

regeneruotas iš bandomojo ruožo mišinio (05-P-R), pagal gautus tyrimo duomenis atitinkamai 2,58 ir 2,16. O nemodifikuoto bitumo 50/70 po RTFOT ir regeneruoto iš eksploatuojamo kelio pasikeitė nežymiai.



2.8 pav. Bitumo penetracijos pasiskirstymas

Fig. 2.8. The comparison of bitumen binders needle penetration values

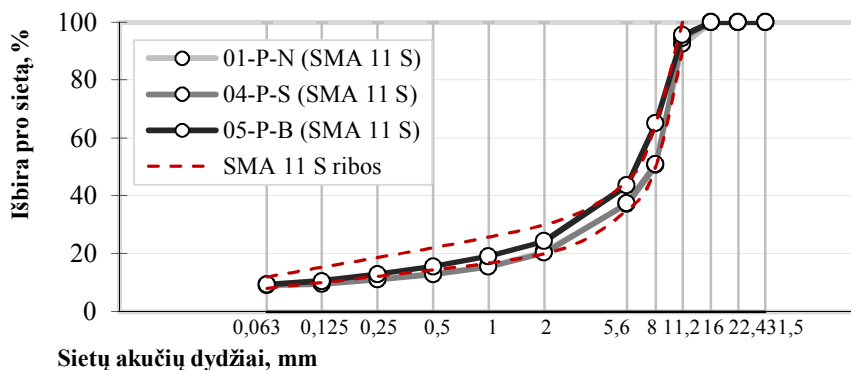


2.9 pav. Bitumo minkštėjimo temperatūros pasiskirstymas

Fig. 2.9. The comparison of bitumen binders softening point values

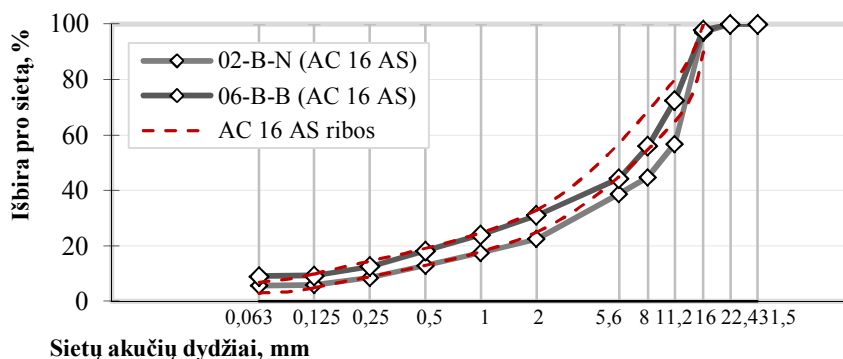
2.2.2. Asfalto mišinių fizikinių savybių rezultatai

Asfalto viršutinių, apatinių ir pagrindo sluoksnių mišinių granulimetrinė sudėtis pateikta atitinkamai 2.10, 2.11 ir 2.12 paveiksluose. Asfalto mišinių tariamasis ir didžiausias tankis pateiktas 2.13 paveiksle. Bituminio rišiklio ir oro tuštymių kiekiai asfalto mišiniuose 2.14 paveiksle. Asfalto viršutinių ir apatinių mišinių stambieji užpildai yra granito skaldos, pagrindo sluoksnių žvirgždo (03-B-N) ir dolomito (07-B-B) skaldos.



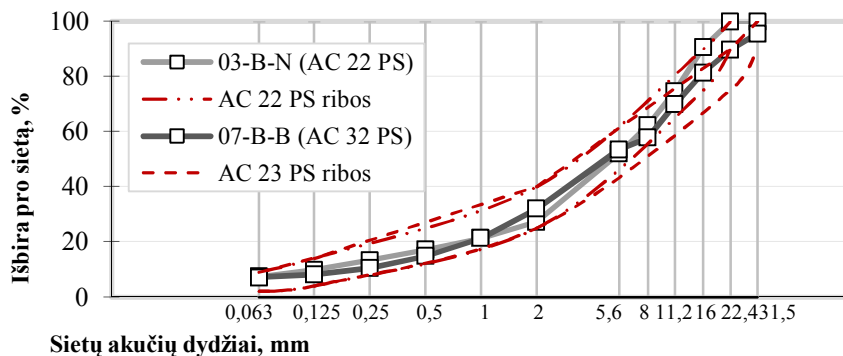
2.10 pav. Asfalto viršutinio sluoksnio mišinių granulimetrinė sudėtis

Fig. 2.10. The granular composition of asphalt wearing (top) layer mixtures



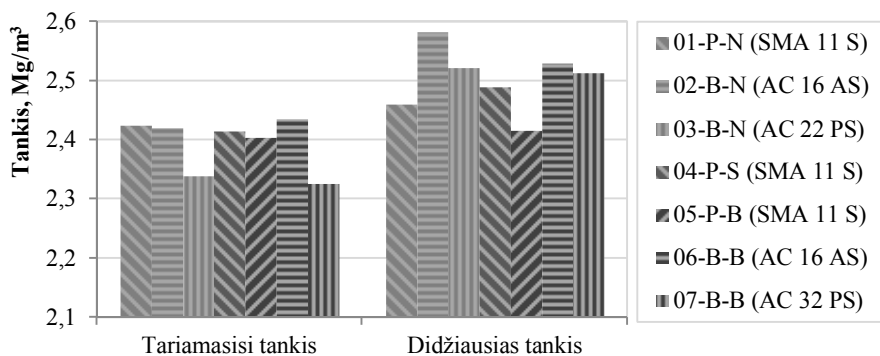
2.11 pav. Asfalto apatinio sluoksnio mišinių granulimetrinė sudėtis

Fig. 2.11. The granular composition of asphalt binder layer mixtures

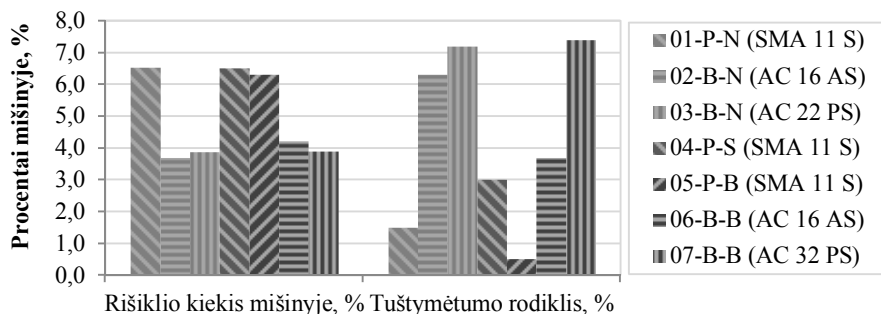


2.12 pav. Asfalto pagrindo sluoksnio mišinių granulimetrinė sudėtis

Fig. 2.12. The granular composition of asphalt base layer mixtures



2.13 pav. Asfalto mišinių tariamasis ir didžiausias tankis
Fig. 2.13. The bulk and maximum density of asphalt mixtures



2.14 pav. Bitumo ir oro tuštymių kiekiai asfalto mišiniuose
Fig. 2.14. The bitumen binder and air voids content of asphalt mixtures

Granulimetrinių kreivių analizė rodo (2.10, 2.11 ir 2.12 pav.), jog daugeliu atvejų mišinių granulimetrinė sudėtis atitiko TRA Asfaltas 08 2009 reikalavimus. Granulimetrinė sudėtis nuokrypis nustatytas bandomojo ruožo 12-os dangos konstrukcijos asfalto apatinio sluoksnio AC 16 AS mišiniui (06-B-B).

Iš 2.14 paveikslo matoma, kad asfalto viršutinio sluoksnio mišinių (01-P-N, 04-P-S, 05-P-B), taip pat kaip apatinių ir pagrindo sluoksnių mišinių (02-B-N, 03-B-N, 06-B-B, 07-B-B), lyginant tarpusavyje bitumo kiekis mažai kinta ir yra atitinkamai 6,45 % (S_r 0,12) ir 3,92 % (S_r 0,12). Mažiausias oro tuštymių kiekis SMA 11 S mišiniui (05-P-B) iš bandomojo ruožo asfalto viršutinio sluoksnio – 0,5 %. Toks žemas oro tuštymių procentas galimai sąlygotas transporto apkrovų poveikio eksploatacijos metu.

2.2.3. Bitumo mechaninių savybių rezultatai

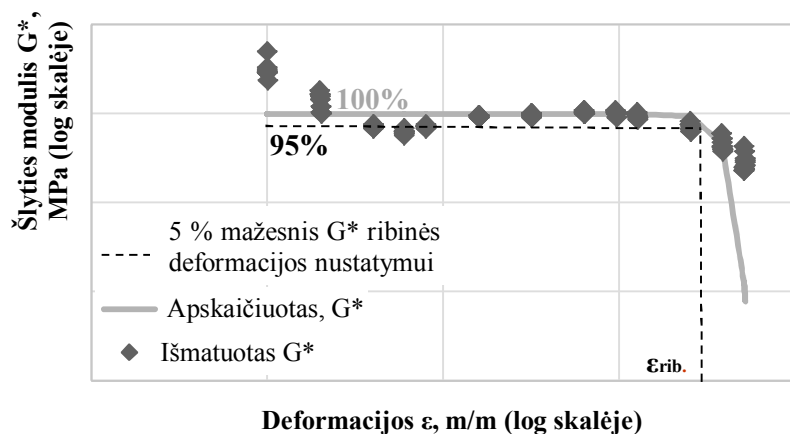
2.2.3.1. Bitumo tiesiškai tampriai klampių ribų nustatymo bandymo rezultatai

Bitumo klampa kinta priklausomai nuo temperatūros. Bitumo šlyties modulio tiesiškai tampriai klampios (LVE) ribos yra daugiau teorinės. Anderson et al. (1994) pasiūlė LVE ribą traktuoti kaip deformacijas arba įtempimus prie kurių bituminio rišiklio šlyties modulio vertė sumažėja 5 %. Šis metodas yra visuotinai pripažintas ir plačiai taikomas užsienio šalių mokslininkų (Marasteanu *et al.* 2000; Airey *et al.* 2003).

LVE riba bituminiam rišikliui nustatoma deformacijų arba įtempimų diapazono bandymo būdu, kurio metu palaipsniui didinamos deformacijos arba įtempimai. Iš 2.15 paveikslo matoma, kad esant mažoms ir didelėms deformacijoms dinaminio šlyties modulio vertės netolygios ir išsibarsčiusios. Pirmuoju atveju bandymo metu nustatytas sūkio momentas yra per mažas tiksliai kampinės deformacijos išmatavimui (dėl DSR prietaiso matavimo galimybių). Antruoju atveju bitumas nebeatlaiko sūkio momento apkrovos ir funkcionuoja netiesiškai. Taigi, bandymais išmatuotoms G^* vertėms (2.15 pav.) pritaikoma trijų kintamųjų sigmoidinė funkcija. Sigmoidinės funkcijos pritaikymas atliktas Excel SOLVER minimizuojant šlyties modulio matavimo ir funkcijos SSE paklaidą. Pagal sigmoidinės funkcijos kitimą apskaičiuojamas 5 % mažesnis šlyties modulis ir ribinės deformacijos.

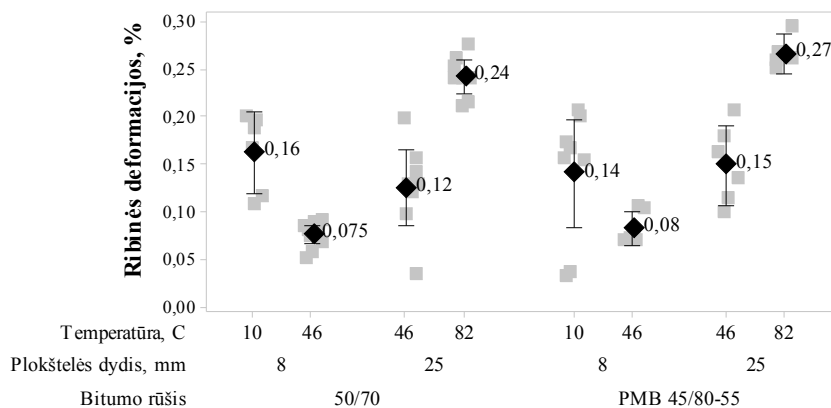
Ribinių deformacijų ir vidutinių reikšmių sklaidos su 95 % patikimumo ribomis grafikas pagal bandymo temperatūrą, plokštelės dydį ir bitumo rūšį pateiktas 2.16 paveiksle. Bandymais nustatyta, kad natūralaus bitumo 50/70 vidutinės ribinių deformacijų vertės 8 mm plokštei prie 10 °C ir 46 °C atitinkamai yra 0,075 % ir 0,16 %, bei 25 mm plokštei prie 46 °C ir 82 °C atitinkamai yra 0,12 % ir 0,24 %. Polimerais modifikuoto bitumo PMB 45/80-55 vidutinės ribinių deformacijų vertės 8 mm plokštei prie 10 °C ir 46 °C atitinkamai yra 0,14 % ir 0,08 %, bei 25 mm plokštei prie 46 °C ir 82 °C atitinkamai yra 0,15 % ir 0,27 %. Nustatyta, kad PMB 45/80-55 LVE riba yra vidutiniškai 0,8 % didesnė nei 50/70.

Kaip matyti iš 2.16 paveikslo, mažiausias patikimumas su plačiausiomis ribomis nustatytas iš bandymų, atliktų prie žemų temperatūrų, t. y., atliekant bandymus su 8 mm plokšte prie 10 °C ir su 25 mm plokšte prie 46 °C. Apskaičiuotos ribinės deformacijos vertės varijuoja dėl nepakankamo nustatytų duomenų tikslumo ir didelio šlyties modulio išsibarstymo, kurie susiję su DSR HAAKE MARS techninėmis galimybėmis. Todėl ribinė deformacija prie žemų temperatūrų imama pagal šio prietaiso didžiausią galimą sūkio momentą neviršijant 60 000 μNm . Bitumo LVE ribos kompleksinio šlyties modulio bandymui pateiktos 2.3 lentelėje.



2.15 pav. Deformacijų diapazono bandymo duomenų analizė ir LVE ribų nustatymas

Fig. 2.15. The data analysis of strain sweep test and determination of LVE rage



2.16 pav. Ribinių deformacijų ir vidutinių reikšmių sklaidos grafikas pagal bandymo temperatūrą, plokštelės dydį ir bitumo rūšį

Fig. 2.16. The scatterplot of limit strain and mean values according to test temperature, plate size and binder type

2.3 lentelė. Bitumo tiesiškai tampriai klampios ribos šlyties modulio bandymui
Table 2.3. The linear visco-elastic range for dynamic modulus test of bitumen binders

Kodas (Bitumo rūšis)	Plokštelė 8 mm		Plokštelė 25 mm	
	T, °C	ϵ_{rib} , %	T, °C	ϵ_{rib} , %
01-P-A (PMB 45/80-55)	46	0,104	46	0,192
	40	0,089	52	0,203
	34	0,074	58	0,214
	28	0,059	64	0,226
	22	0,045	70	0,237
	16	0,030	76	0,248
	10	0,015	82	0,260
02-B-A (50/70)	46	0,086	46	0,130
	40	0,074	52	0,151
	34	0,062	58	0,171
	28	0,049	64	0,191
	22	0,037	70	0,211
	16	0,024	76	0,230
	10	0,011	82	0,250
03-B-A (50/70)	46	0,079	46	0,111
	40	0,068	52	0,136
	34	0,057	58	0,160
	28	0,046	64	0,185
	22	0,034	70	0,209
	16	0,023	76	0,233
	10	0,011	82	0,258
04-P-R (PMB 45/80-55)	46	0,069	46	0,116
	40	0,060	52	0,128
	34	0,050	58	0,140
	28	0,041	64	0,152
	22	0,031	70	0,164
	16	0,021	76	0,175
	10	0,012	82	0,187

Kodas (Bitumo rūšis)	Plokštelė 8 mm		Plokštelė 25 mm	
	T, °C	ϵ_{rib} , %	T, °C	ϵ_{rib} , %
05-P-R (PMB 45/80-55)	46	0,070	46	0,137
	40	0,062	52	0,160
	34	0,055	58	0,182
	28	0,047	64	0,204
	22	0,039	70	0,227
	16	0,032	76	0,249
	10	0,024	82	0,272
06-B-R (50/70)	46	0,076	46	0,176
	40	0,067	52	0,182
	34	0,058	58	0,188
	28	0,049	64	0,194
	22	0,040	70	0,200
	16	0,031	76	0,207
	10	0,022	82	0,213
07-B-R (50/70)	46	0,057	46	0,080
	40	0,050	52	0,108
	34	0,042	58	0,135
	28	0,035	64	0,163
	22	0,027	70	0,190
	16	0,020	76	0,218
	10	0,012	82	0,246

Pastaba. Ribinės deformacijos nustatytos iš dviejų bandinių rezultatų išbandytų deformacijų diapazono būdu prie 10 °C ir 46 °C su 8 mm plokštele 46 °C ir 82 °C su 25 mm plokštele (15,92 Hz). Tarpinių temperatūrų vertės apskaičiuotos tiesinės interpoliacijos metodu.

Apibendrinat deformacijų diapazono bandymo rezultatus ir nustatytas LVE ribas ištirtiems bituminiais rišikliams, galima teigti:

- LVE ribos priklauso nuo bituminio rišiklio rūšies ir senėjimo procesų.
- Deformacijų diapazono bandymai LVE riboms nustatyti, bandymai bituminiais rišikliams turi būti atliekami su DSR prietaisu, kuris gali fiksuoti didesnę kaip 100 000 μNm sūkio momento apkrovą osiliacinio bandymo metu.
- Siekiant tikslumo rekomenduojama LVE ribas nustatyti ir prie 0,159 Hz.

- Dinaminio šlyties modulio dažnių diapazono bandymams rekomenduojama taikyti mažesnes nei vidutines nustatytas ribines deformacijas bei įvertinti prietaiso technines galimybes.

2.2.3.2. Bituminio rišiklio dinaminio šlyties modulio bandymo rezultatai

Bituminio rišiklio reologinės savybės nustatomos įvairiais metodais (Paliukaite 2014; Paliukaite *et al.* 2015; Gajewski *et al.* 2015), tačiau dažniausiai taikomas ciklinis osciliacijos bandymas (Yusoff *et al.* 2013) atliekamas su DSR prie įvairių temperatūrų ir apkrovų dažnių. Deformacijos ir įtempimai osciliacinio bandymo metu nustatomi pagal bandinio geometriją, sūkio momentą ir kampinę deformaciją. DSR programinė įranga bandymo metu apskaičiuoja šlyties modulį iš fazės kampo tarp kampinės deformacijos ir apkrovos amplitudės.

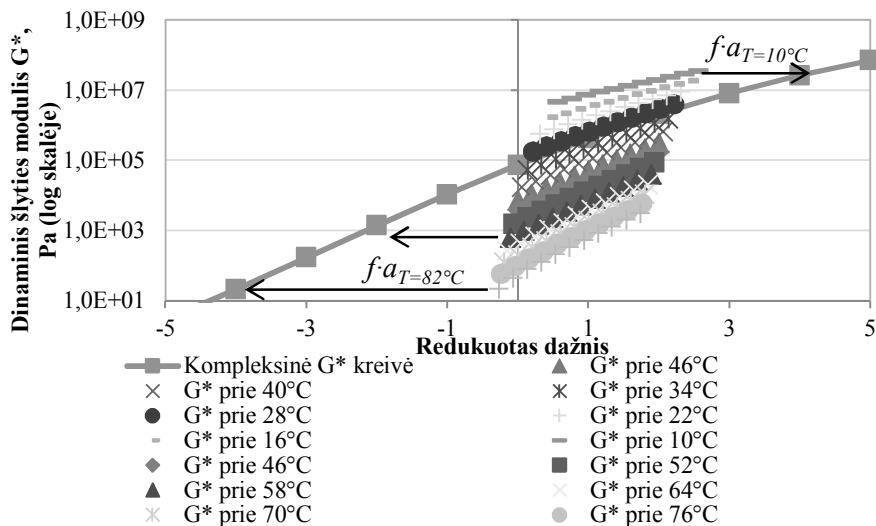
Bandymo metu nustatytos bituminių rišiklių šlyties modulio vertės prie skirtingų temperatūrų (toliau – G^* izotermės) taikant superpozicijos principą perslinktos (2.17 pav.) į referencinę 46 °C temperatūrą horizontalia kryptimi (2.18 pav.). G^* izotermių perslinkimas atliktas taikant Gordon-Shaw metodą optimizuojant atstumą tarp kreivių porų (Gordon *et al.* 1994; Rowe *et al.* 2001; Rowe *et al.* 2011). Izotermių perslinkimas Gordon-Shaw skaičiavimo metodu aprašytas 1.4.2 poskyryje. Bituminio rišiklio šlyties modulio ir fazės kampo kompleksinės kreivės pateiktos atitinkamai 2.18 ir 2.19 paveiksluose.

Asfalto dangos eksploatacinės savybės gali būti siejamos su bitumo savybėmis, t. y. atsparumu provėžoms, nuovargiui ir temperatūriniais plyšiams (Kennedy *et al.* 1990; Lytton *et al.* 1993; C-SHRP 1995). Superpave® specifikacijose bitumas klasifikuojamas pagal dinaminį šlyties modulį ir fazės kampą nustatytus prie 10 rad/s. Bitumo eksploatacinių savybių (PG) atsparumo provėžoms ir nuovargiui reikalavimai pagal AASHTO M320 pateikti 2.4 lentelėje. Bitumo atsparumui provėžoms įvertinti taikytos ribinės vertės po trumpalaikio sendinimo (RTFOT).

2.4 lentelė. Bitumo eksploatacinių savybių (PG) atsparumo provėžoms ir nuovargiui kriterijai (AASHTO M320-10 2010)

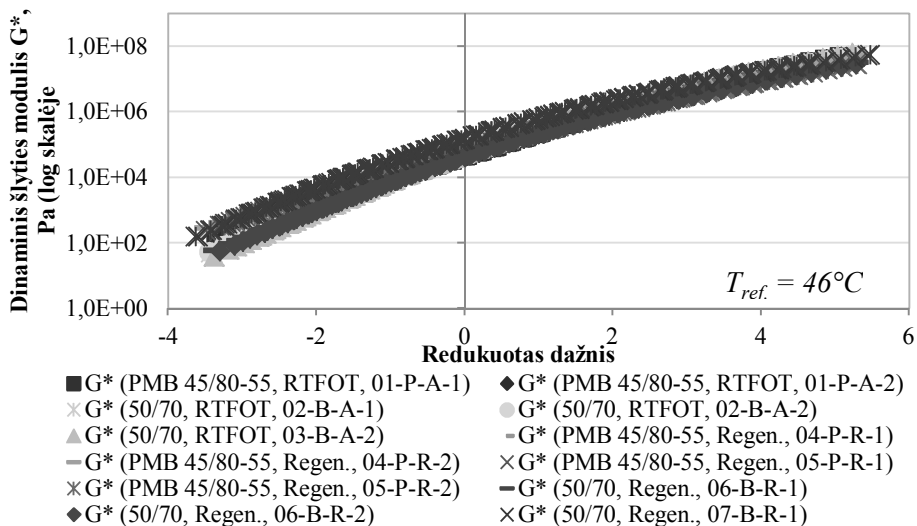
Table 2.4. Requirements for bitumen performance grade based on resistance to fatigue and rutting (AASHTO M320-10 2010)

Eksploatacinė savybė	Sendinimo etapas	Reikšmė	Ribinė vertė, kPa
Atsparumas provėžoms	Natūralus	$G^*/\sin\delta$	$\geq 1,0$
	RTFOT		$\geq 2,2$
Atsparumas nuovargiui	PAV	$G^* \cdot \sin\delta$	< 5000



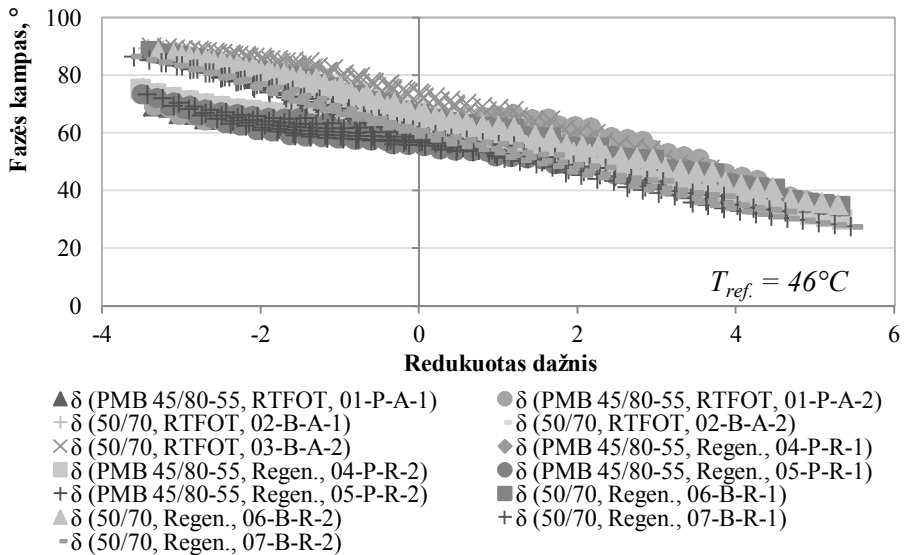
2.17 pav. Dinaminio šlyties modulio G^* kreivės perslinkimas optimizuojant atstumą tarp izolinių

Fig. 2.17. The dynamic shear modulus G^* shifting to the mastercurve by optimising distance between isolines



2.18 pav. Bituminių rišiklių dinaminio šlyties modulio kompleksinės kreivės

Fig. 2.18. The mastercurve of bitumen binders dynamic shear modulus

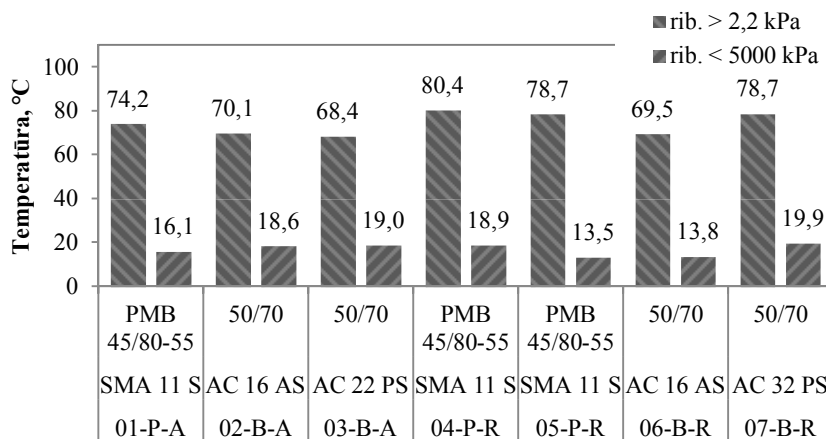


2.19 pav. Bituminių rišiklių fazės kampo kompleksinės kreivės

Fig. 2.19. The mastercurve of bitumen binders phase angle

Atsižvelgiant į 2.4 lentelėje pateiktus reikalavimus, nustatytos tirtų bitumų ribinės eksploatacijos temperatūros pagal bitumo atsparumo provėžoms ir nuovargiui kriterijus (2.20 pav.). Iš 2.20 paveikslo matoma, kad bitumui senėjant ribinė atsparumo provėžoms temperatūra didėja. Nustatyta, 4,5 °C žemesnė ribinė atsparumo provėžoms (2.20 pav. rib. > 2,2 kPa) temperatūra polimeriais modifikuoto bitumo po RTFOT (01-P-A) lyginant su tos pačios rūšies bitumu regeneruotu (05-P-R) iš 8-erių metų eksploatuoto kelio dangos. Šis pokytis rodo, kad eksploatacijos metu bitumas veikiamas oksidacijos kietėja, todėl ribinė eksploatacijos temperatūra didėja. Mažas ribinės temperatūros skirtumas (0,6 °C) nustatytas nemodifikuotam bitumui 50/70 po RTFOT (02-B-A) ir tos pačios rūšies po regeneravimo bitumui (06-B-R). Galima iš dalies teigti, kad asfalto apatinio sluoksnio bitumo atsparumas provėžoms eksploatacijos metu praktiškai nesikeičia. Analizuojant asfalto pagrindo sluoksnio bitumo 50/70 po RTFOT (03-B-A) ir po regeneravimo (07-B-R) nustatyta, kad ribinė bitumo atsparumo provėžoms temperatūra skiriasi per 10,3 °C. Šiam skirtumui pagrįsti reikia atlikti detalesnius bitumo cheminės ir komponentinės sudėties tyrimus.

Analizuojant ribinę bitumo atsparumo nuovargiui temperatūrą matoma tendencija, kad bitumui senėjant ribinė temperatūra mažėja. Nustatyta, 2,6 °C žemesnė ribinė atsparumo nuovargiui (2.20 pav. rib. < 5000 kPa) temperatūra polimeriais modifikuoto bitumo po RTFOT (01-P-A) lyginant su tos pačios rūšies bitumu po regeneravimo (05-P-R).



2.20 pav. Bitumo ribinės eksploatacijos temperatūros pagal atsparumo provėžoms ir nuovargiui kriterijus

Fig. 2.20. The limit binder performance temperatures based on resistance to fatigue and rutting

Nustatyta, kad ribinė atsparumo nuovargiui temperatūra sumažėjo 4,8 °C nemodifikuotam bitumui 50/70. Vėlgi, priešingam asfalto pagrindo sluoksnio regeneruoto bitumo (07-B-R) ribinės temperatūros padidėjimo pagrindimui reikalingi detalesni tyrimai.

Bitumo mechanines savybes geriausiai reprezentuoja kompleksinė dinaminio šlyties modulio kreivė, kuri tiesiogiai gali būti taikoma asfalto mišinio kompleksinei dinaminio tamprumo modulio kreivei nustatyti. Bitumo kompleksinė kreivė, apibrėžta sigmoidine Richards modelio funkcija, parodė labai gerą suderinamumą su išmatuotomis vertėmis.

Konvertuota Richards modelio funkcija pritaikyta fazės kampo kompleksinei kreivei atitiko bandymais išmatuoto nemodifikuoto bitumo fazės kampo kreivės formą. Tačiau polimerais modifikuoto bitumo fazės kampo kompleksinė kreivė yra sunkiai prognozuojama ir konvertuota Richards modelio funkcija fazės kampo apibrėžimui iš dalies atitiko išmatuotų fazės kampo verčių kreivės formą.

2.2.4. Asfalto mišinių mechaninių savybių rezultatai

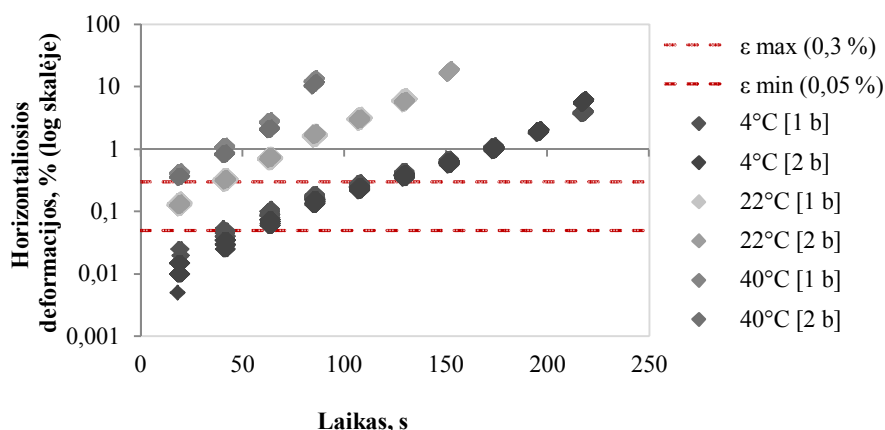
2.2.4.1. Asfalto mišinių tiesiškai tampriai klampių ribų nustatymo bandymo rezultatai

Asfalto mišinių dinaminio tamprumo modulio tiesiškai tampriai klampios (LVE) ribos yra siauros ir mažėja kylant temperatūrai bei yra sunkiai nustatomos

(Francken 1998). Pagal RDO Asphal 09 metodiką tamprumo modulis turi būti nustatytas prie apkrovų užtikrinančių horizontaliąsias deformacijos 0,05 – 0,3 % intervale (FGSV 498 2009). Pagal AASHTO dinaminis modulis turi būti nustatytas esant ašinėms deformacijoms tarp 50 ir 150 $\mu\text{m/m}$ (AASHTO T342-11 2013).

Taigi, asfalto mišiniams panašiai kaip ir bituminiams rišikliams, LVE riba nustatoma didėjančių deformacijų arba įtempimų bandymo būdu. Tiesiškai tampriai klampios ribos nustatytos vadovaujantis dviem kriterijais: teoriniu – horizontaliųjų deformacijų ribos 0,05–0,3 % ir techniniu – įrangos techninės galimybės (mažiausia apkrova esant sinusoidiniam apkrovos tipui 0,1 kN, didžiausia 10 kN).

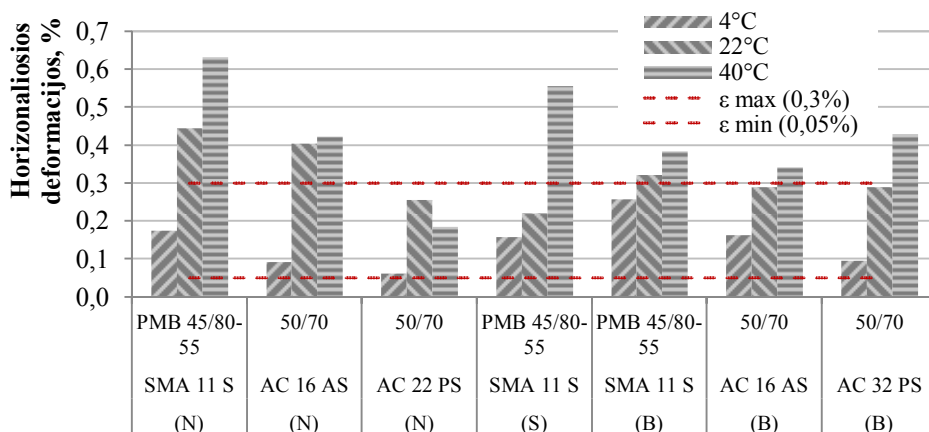
Horizontaliųjų deformacijų kitimas laiko atžvilgiu asfalto mišinio AC 16 AS (N) tiesiškai tampriai klampių ribų bandymo metu 2.21 paveiksle, kur tam tikri taškai atspindi ciklinės apkrovos pokyčių diapazonus.



2.21 pav. Horizontaliųjų deformacijų kitimas laiko atžvilgiu asfalto mišinio AC 16 AS (N) tiesiškai tampriai klampių ribų bandymo metu

Fig. 2.21. The variation of horizontal strain according to time under linear visco-elastic range test of AC 16 AS (N) mixture

Analizuojant LVE bandymo rezultatus, nustatyta, kad asfalto mišiniuose esant 40 °C prie mažiausių apkrovos žingsnio etapų suiro, todėl tamprumo modulio bandymų temperatūrų diapazonas sumažintas iki 34 °C. Asfalto mišinių dinaminio tamprumo modulio bandymo apkrovos LVE ribose pateiktos 2.22 paveiksle ir 2.5 lentelėje.



2.22 pav. Asfalto mišinių tiesiškai tampriai klampios ribinės deformacijos

Fig. 2.22. The limit strain of linear visco elastic range of asphalt mixtures

2.5 lentelė. Asfalto mišinių tamprumo modulio bandymo apkrovos tiesiškai tampriai klampiose ribose

Table 2.5. The load conditions of asphalt mixture dynamic modulus test under linear visco-elastic range

Asfalto mišinys	Bituminio rišiklio rūšis	Sendinimas	Bandymo temperatūra					
			4 °C	10 °C	16 °C	22 °C	28 °C	34 °C
			Apkrova bandymo metu, N					
SMA 11 S	PMB 45/80-55	N	3300	1900	1450	500	300	150
AC 16 AS	50/70	N	4500	3450	3050	2350	1300	250
AC 22 PS	50/70	N	9000	6400	5600	3800	2150	500
SMA 11 S	PMB 45/80-55	S	3200	1850	1400	550	300	150
SMA 11 S	PMB 45/80-55	B	1700	1000	780	300	200	150
AC 16 AS	50/70	B	5000	3050	2400	1100	650	150
AC 32 PS	50/70	B	8800	5750	4750	2700	1650	600

2.2.4.2. Dinaminio tamprumo modulio bandymo rezultatai

Asfalto mišinių dinaminio tamprumo moduliai nustatyti taikant 2.5 lentelės apkrovas, kurios užtikrino LVE sąlygas. Moduliai apskaičiuoti analizuojant 10 paskutinių ciklų dažnio etape, nustatant vidutinę sinusoidinės apkrovos amplitudę ir deformacijas iš kiekvieno LVDT daviklio ir poslinkio sensoriaus. Skaičiavimai atlikti vadovaujantis AL Sp-Asphalt 09 (FGSV 430 2009), standartais (LST EN 12697-26 2012; LST EN 12697-24 2012; AASHTO T342-

11 2013; AASHTO T322-07 2011) bei mokslo tiriamaisiais darbais (Pellinen et al. 2005; Zofka 2007).

Pirmiausia, apskaičiuoti įtempimai bandymo metu pagal formulę 2.1 (FGSV 430 2009):

$$\sigma = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d \cdot h}, \quad (2.1)$$

čia σ – horizontalieji įtempimai bandinio centre, MPa; F – apkrova, N; d – bandinio storis, mm; h – bandinio aukštis, mm.

Bandymo metu fiksuotiems apkrovos, vertikalaus ir horizontalaus poslinkių matavimams pritaikytos sinusoidinės funkcijos 2.2 ir 2.3:

$$F(t) = A + B \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t + C), \quad (2.2)$$

$$u(t) = a + b \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t + c), \quad (2.3)$$

čia $F(t)$ – apkrovos funkcija laiko atžvilgiu, N; t – laikas, s; f – dažnis, Hz; A – koeficientas, įvertinantis apkrovos funkcijos poziciją x ašyje, N; B – apkrovos funkcijos amplitudė, N; C – fazės kampas, rad; $u(t)$ – horizontaliųjų poslinkių funkcija laiko atžvilgiu, mm; a – koeficientas įvertinantis horizontaliojo poslinkio funkcijos poziciją x ašyje, mm; b – horizontaliojo poslinkio funkcijos amplitudė, mm; c – fazės kampas, rad.

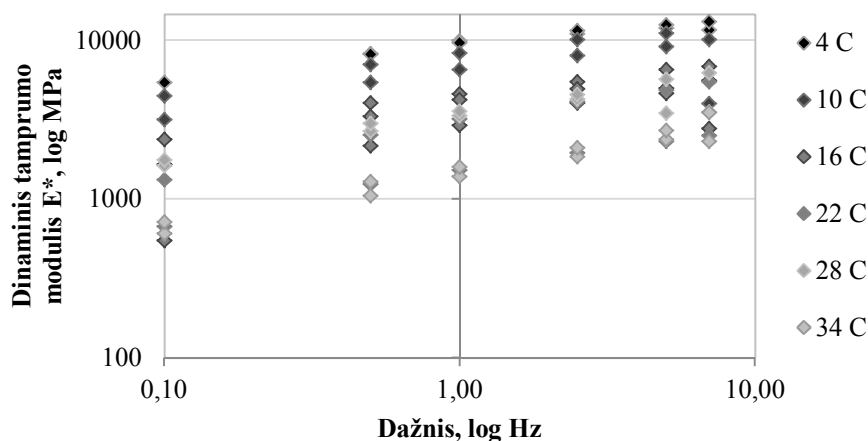
Tuomet dinaminis tamprumo modulis ir fazės kampas apskaičiuojami pagal formules 2.4 ir 2.5:

$$|E^*| = \frac{\Delta F \cdot (0,274 + \nu)}{h \cdot \Delta u}, \quad (2.4)$$

$$\varphi = (c - C) \cdot \frac{180}{\pi}, \quad (2.5)$$

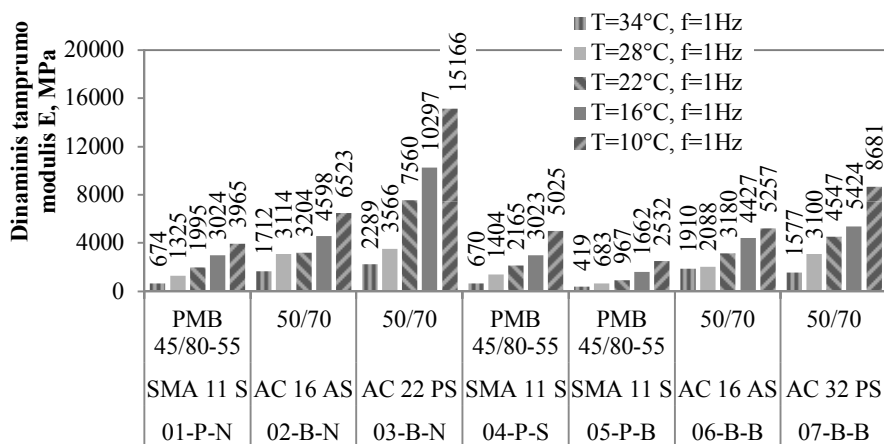
čia ΔF – apkrovos funkcijos pokytis $\Delta F = 2 \cdot B$, N; ν – Puasono koeficientas pagal formulę 1.11, -; Δu – horizontaliųjų poslinkių funkcijos pokytis $\Delta u = 2 \cdot b$, mm.

Nustatyti asfalto mišinių dinaminio tamprumo moduliai netiesioginio tempimo bandymu pateikti priede C. Asfalto mišinio AC 16 AS (N) tamprumo modulio kitimas priklausomai nuo temperatūros ir dažnio pateiktas 2.23 paveiksle. Asfalto mišinių tamprumo modulio prie 1 Hz dažnio palyginimas pateiktas 2.24 paveiksle.



2.23 pav. Asfalto mišinio AC 16 AS (N) kompleksinio tamprumo modulio kitimas priklausomai nuo temperatūros ir dažnio

Fig. 2.23. The complex modulus under different temperature and frequency conditions of asphalt mix AC 16 AS (N)



2.24 pav. Asfalto mišinių dinaminio tamprumo modulio prie 1 Hz dažnio palyginimas

Fig. 2.24. The comparison of asphalt mixtures dynamic modulus measured at 1 Hz

Netiesioginio tempimo bandymu nustatyto dinaminio tamprumo modulio rezultatai parodė (2.24 pav.), kad asfalto mišinių, paimtų iš 8-nis metus eksploatuojamo kelio dangos modulio vertės yra mažesnės už tos pačios rūšies 2015 metais pagamintų asfalto mišinių. Nustatytas didžiausias procentinis dinaminio modulio pokytis asfalto viršutinio sluoksnio mišiniui SMA 11 S su PMB 45/80-55 (05-P-B), šio mišinio modulis vidutiniškai 44 % mažesnis lyginant su tos pačios rūšies nauju mišiniu (01-P-N). Didelis dinaminio modulio pokytis nustatytas ir asfalto pagrindo sluoksnių mišiniams, asfalto mišiniui AC 32 PS (07-B-B) nustatytas vidutiniškai 35 % mažesnis dinaminis modulis nei AC 22 PS (03-B-N). Mažiausias dinaminio modulio skirtumas nustatytas asfalto apatinio sluoksnio mišiniui AC 16 AS (06-B-B), šio mišinio modulis vidutiniškai 9 % mažesnis lyginant su tos pačios rūšies nauju mišiniu (02-B-N).

Eksperimento metu sendino asfalto viršutinio sluoksnio mišinio SMA 11 S (04-P-S) dinaminio tamprumo modulio vertės pasikeitė nežymiai lyginant su tos pačios rūšies nauju mišiniu (01-P-N). Esant aukštai temperatūrai (34 °C) nustatytas šio mišinio (04-P-S) po ilgos trukmės sendinimo dinaminio tamprumo modulio padidėjimas, – tai prieštarauja SMA 11 S mišinio (05-P-B) iš 8-erius metus eksploatuojamo kelio dangos modulio vertėms. Atsižvelgiant į tai, galima teigti, kad taikyta asfalto mišinio ilgalaikio sendinimo procedūra neužtikrina natūralaus mišinio senėjimo procesų, veikiančių dangą eksploatacijos metu. Todėl dangos konstrukcijos funkcionavimo skaičiavimams SMA 11 S (04-P-S) mišinio duomenys toliau nenaudojami.

Asfalto mišinių mechaninių savybių bandymais nustatyta, jog prie žemų temperatūrų (< 10 °C) netiesioginio tempimo bandymo metu horizontalios ir vertikalios deformacijos yra mažos, todėl norint jas užfiksuoti davikliu turi būti priklijuoti bandinio centre. Bandymų rezultatai parodė, kad rėmas su LVDT davikliais labai netolygiai fiksavo duomenis bandymo metu, o tai apribojo duomenų analizę ir pritaikymą.

2.3. Asfalto mechaninių savybių apskaičiavimas pagal mišinio komponentų savybes

Asfalto mišinių tirtos mechaninės savybės (t. y. dinaminis tamprumo modulis E^*) pagal mišinio komponentų sudėtį apskaičiuotos taikant Hirsch modelį (Christensen *et al.* 2003). Hirsch modelio pritaikymas tirtiems asfalto mišiniams atliktas etapais:

1. Hirsch modelio atitikimo tyrimas ir koeficientų patikslinimas:
 - apskaičiuoti pirminiai $E_{C(calc.)}^*$ taikant Hirsch modelį su Christensen *et al.* (2003) koeficientais ($E_a = 4200000$, $P_0 = 20$, $P_1 = 0,58$, $P_2 = 650$) prie

- atitinkamų asfalto mišinių eksperimentinių E^* bandymų temperatūrų ir dažnių sąlygų;
- apskaičiuoti $E^*_{C(calc.)}$ palyginti su eksperimentais nustatytais $E^*_{(meas.)}$ prie identiškų bandymų sąlygų;
 - patikslinti Hirsch modelio koeficientai atsižvelgiant į eksperimentu nustatytus $E^*_{(meas.)}$.
2. Asfalto mišinių dinaminio tamprumo modulio apskaičiavimas taikant patikslintą Hirsch modelį
- perskaičiuoti asfalto mišinių dinaminiai tamprumo moduliai pagal Hirsch modelį su patikslintais koeficientais $E^*_{H(calc.)}$ prie visų bandymo sąlygų (0,16–15,9 Hz dažnių ir 10–82 °C temperatūrų);
 - pertvarkyti $E^*_{H(calc.)}$ į kompleksines kreives prie referencinės temperatūros ($T_{ref.} = 22\text{ °C}$) taikant Gordon-Shaw metodą;
 - nustatyti pertvarkytos $E^*_{H(calc.)}$ kompleksinės kreivės charakterizuojantys funkcijos kintamieji.
3. Patikslinto Hirsch modelio tinkamumo asfalto mechaninių savybių apskaičiavimui pagrindimas:
- perskaičiuoti $E^*_{H(calc.)}$ moduliai prie 10–34 °C temperatūrų ir 0,1–7,0 Hz dažnių pagal kompleksines kreives charakterizuojančias funkcijas;
 - palyginti perskaičiuoti $E^*_{H(calc.)}$ su tokiomis pačiomis sąlygomis eksperimentu nustatytais $E^*_{(meas.)}$, atlikta statistinė analizė bei nustatytas Hirsch modelio patikimumas.

Hirsch modelio tinkamumas tirtų asfalto mišinių dinaminio tamprumo modulio apskaičiavimui nustatytas analizuojant apskaičiuotų ir išmatuotų E^* procentines paklaidas. Procentinė paklaida apskaičiuota taikant formulę 2.6:

$$Pakl. = \frac{(E^*_{C;H(calc.)} - E^*_{(meas.)})}{E^*_{(meas.)}} \cdot 100\% , \quad (2.6)$$

čia $E^*_{C;H(calc.)}$ – apskaičiuotas pagal Hirsch modelį asfalto mišinių dinaminis tamprumo modulis: su indeksu C – taikant teorinius koeficientus; su indeksu H – šio tyrimo metu patikslintus koeficientus, MPa; $E^*_{(meas.)}$ – eksperimentu nustatytas asfalto dinaminis tamprumo modulis, MPa.

Apskaičiuotų pagal Hirsch modelį su teoriniais koeficientais ir patikslintais bei eksperimentu išmatuotų dinaminio tamprumo modulių procentinės paklaidos analizuotos taikant Fisher (F-test) testo, normalumo tikrinimo, dviejų bandinių Studento (T-Test) ir Kolmogorov-Smirnov (K-S) statistinius metodus.

F testo metu tikrinta dvipusė tikimybė, kad procentinių paklaidų Hirsch modelio su teoriniais koeficientais ir su patikslintais imties dispersijos nėra reikšmingai skirtingos. Šis testas taikomas siekiant nustatyti, ar paklaidos turi

vienodas (lygias) imties dispersijas (Hipotezė H_0). Nustačius, kad P -vertė $< 0,05$, atmetama imčių dispersijos lygumo hipotezė.

Tikrinta paklaidų pasiskirstymo pagal normalųjį (Gauso) skirstinį sąlyga taikant Anderson-Darling (AD) statistinį metodą, priimant hipotezes: H_0 : procentinė paklaida pasiskirsto pagal normalųjį skirstinį; H_1 : procentinė paklaida nepasiskirsto pagal normalųjį skirstinį. Hipotezės H_0 patvirtinimui ar atmetimui nustatyta P -vertė, kai patikimumo indeksas $\alpha = 0,05$. Nustačius P -vertę mažesnę nei $0,05$, nulinė hipotezė H_0 paklaidos skirstiniui atmetama.

Studento dviejų bandinių bandymu (T-testu) tikrinta $E^*_{H(calc.)}$ ir $E^*_{(meas.)}$ dispersijų (σ_D) lygybė, t. y. ar lyginamos imtys yra priklausomos. Šiuo atveju, keliama statistinė hipotezė $H_0: \sigma_D(E^*_{H(calc.)}) = \sigma_D(E^*_{(meas.)})$, kai alternatyva $H_1: \sigma_D(E^*_{H(calc.)}) \neq \sigma_D(E^*_{(meas.)})$, o patikimumo indeksas $\alpha = 0,05$.

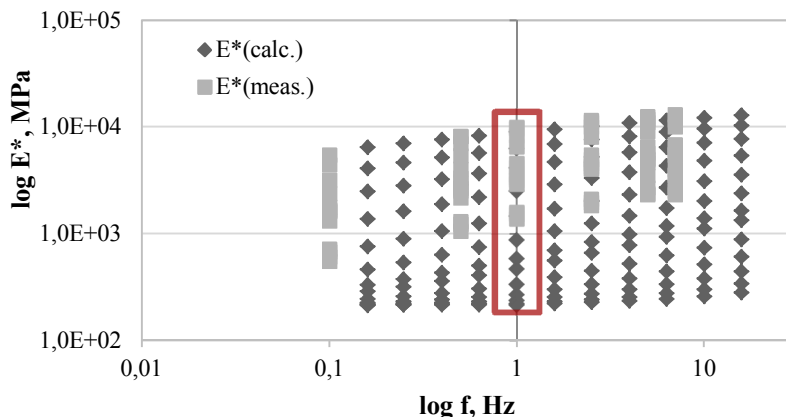
Siekiant įvertinti dinaminio tamprumo modulio, apskaičiuoto taikant patikslintą Hirsch modelį ir nustatyto eksperimento metu skirstinių panašumui tikrinti, atliktas Kolmogorov-Smirnov dviejų bandinių testas (*angl. Two-sample Kolmogorov-Smirnov test*). Kolmogorov-Smirnov dviejų bandinių testas (Darling 1957; Young 1977; Fasano *et al.* 1987) pritaikytas apskaičiuotų ir išmatuotų dinaminio tamprumo modulio skirstinių vienodumui pagrįsti arba atmesti. Daroma prielaida, kad nulinė hipotezė H_0 : apskaičiuoti dinaminio tamprumo moduliai $E^*_{H(calc.)}$ yra tokie patys kaip eksperimentu nustatyti $E^*_{(meas.)}$. K-S bandymu tikrinama, koks tikėtinas šių dviejų dinaminių tamprumo modulių skirtumas. Bandymo metu nustatomas labiausiai tikėtinas skirtumas, P -vertė reprezentuoja, kaip akivaizdžiai vertės skiriasi. H_0 atmetama, jeigu P -vertė yra mažiau už $0,05$.

2.3.1. Hirsch modelio koeficientų patikslinimas

Asfalto mišinių fizikinės savybės (VMA ir VFB) ir bituminio rišiko mechaninės savybės ($G^*(f, T)$) sujungtos Hirsch modeliu pagal 1.35 ir 1.36 formules taikant (Christensen *et al.* 2003) nustatytus koeficientus. Bituminių rišiklių ir asfalto mišinių dinaminių bandymų sąlygos persidengia viename dažnyje (1 Hz) ir penkiose temperatūrose (34 °C, 28 °C, 22 °C, 16 °C, 10 °C). Šiuose sąlyčio taškuose (2.25 pav.) atlikta pirminė Hirsch modelio tikslumo (patikimumo) analizė. Iš eksperimentu nustatyto ir apskaičiuoto E^* sklaidos diagramos (2.26 pav. a) matoma, kad Hirsch modelis su Christensen *et al.* (2003) koeficientais įgalina apskaičiuoti E^* modulį ribose nuo 1 300 iki 10 000 MPa, kai $E^*_{(meas.)}$ modulis kito nuo 450 MPa iki 17 500 MPa.

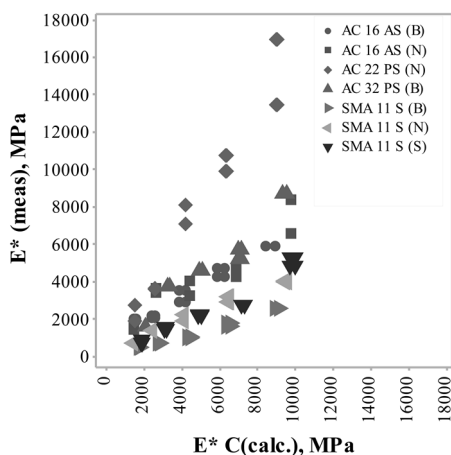
Analizuoiant $E^*_{C(calc.)}$ ir $E^*_{(meas.)}$ procentinę paklaidą (2.26 pav. a) nustatyta, kad Hirsch modelio su Christensen *et al.* (2003) koeficientais vidutinė

skaičiavimo paklaida – 79,5 % su standartiniu nuokrypiu – 109% (2.28 pav.), o nustatyta P-vertė mažesnė nei 0,05. Tai rodo, kad procentinės paklaidos skirstinys neturi normalinio skirstinio požymių.

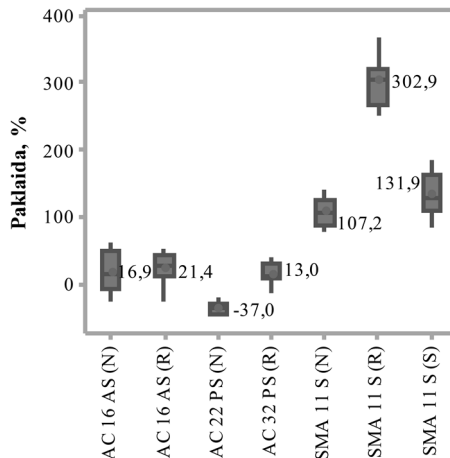


2.25 pav. $E^*_{C(calc.)}$ ir $E^*_{(meas.)}$ modulių lyginamieji sąlyčio taškai kompleksinėje kreivėje

Fig. 2.25. The overlapping points in the curve for comparison of $E^*_{C(calc.)}$ and $E^*_{(meas.)}$ modulus



a)



b)

2.26 pav. Asfalto mišinių $E^*_{C(calc.)}$ ir $E^*_{(meas.)}$: a) nustatyto ir apskaičiuoto E^* sklaidos diagrama; b) procentinės paklaidos stačiakampė diagrama

Fig. 2.26. The percentage error of $E^*_{C(calc.)}$ and $E^*_{(meas.)}$ comparison of asphalt mixtures: a) the scatter plot of measured versus predicted E^* ; b) boxplot

Didžiausias procentinis skirtumas nustatytas SMA mišiniams (2.26 pav. b). Apibendrinant pirminį Hirsch modelio taikymą, galima teigti, jog Christensen et al. (2003) publikuoti koeficientai nėra universalūs, todėl norint taikyti modelį koeficientai turi būti patikslinti atsižvelgiant į vietines medžiagas, mišinių sudėtį ir tamprumo modulio nustatymo procedūrą.

Hirsch modelio koeficientų patikslinimas atliktas minimizuojant skirtumų kvadratų sumą (SSE) netiesinės optimizacijos metodu (Excel SOLVER GRG Nonlinear) keičiant kintamuosius: E_a , P_0 , P_1 ir P_2 . Optimizavimo metu nustatytos patikslintų koeficientų vidutinės vertės iš atskirų bandinių pateiktos kiekvienam mišiniui (2.6 lentelę).

2.6 lentelė. Patikslinti Hirsch modelio koeficientai

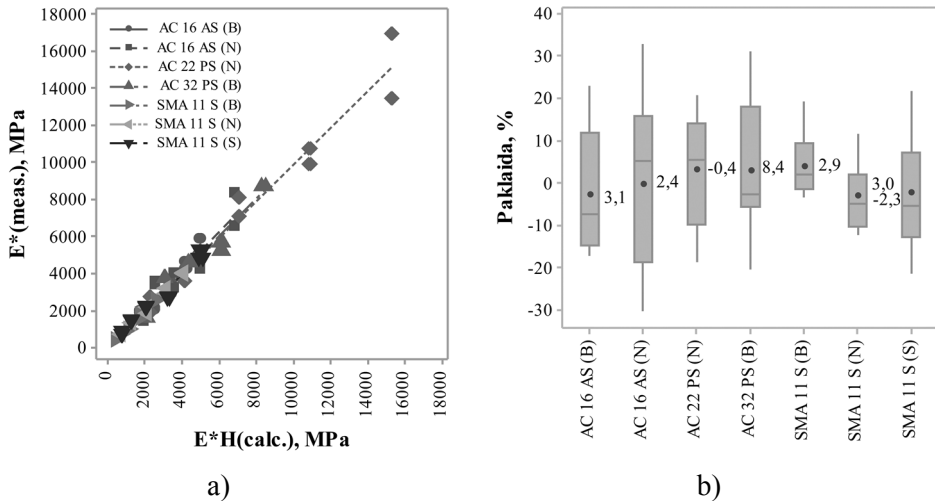
Table 2.6. Defined Hirsch model coefficients

Mišinys	Sendi- nimas	Patikslinti Hirsch modelio koeficientai				R^2	Procentinė paklaida		
		E_a	P_0	P_1	P_2		μ	S_T	P-vertė*
SMA 11 S	N	9,94E+05	19,1	0,72	7,75E+02	0,991	-3,1	7,71	0,188
AC 16 AS	N	5,54E+06	19,1	0,66	9,42E+02	0,961	-0,4	20,03	0,105
AC 22 PS	N	4,73E+08	307,5	0,35	1,61E+04	0,868	3,1	12,94	0,042
SMA 11 S	S	2,01E+07	21,1	0,54	6,79E+03	0,967	-2,3	13,02	0,246
SMA 11 S	B	1,60E+06	19,8	0,58	1,07E+03	0,993	3,7	6,77	<0,005
AC 16 AS	B	1,20E+06	9,2	0,53	9,57E+01	0,940	-2,8	13,50	0,012
AC 32 PS	B	9,78E+08	0,0	0,42	5,32E+04	0,950	2,8	17,32	0,049
* - šiuo atveju P-vertė apibrėžia procentinės paklaidos skirstinio Normalumą (t. y. atitikimą normaliniam Gauso skirstiniui)									

Iš sklaidos diagramos (2.27 pav. a) matoma, kad patikslinus koeficientus $E_{H(calc.)}^*$ vertės yra tiesiškai proporcingos $E_{(meas.)}^*$, ir kinta ribose nuo 433 iki 15200 MPa. Analizuojant $E_{H(calc.)}^*$ ir $E_{(meas.)}^*$ verčių procentinį pokytį nustatyta, kad Hirsch modelio su patikslintais koeficientais vidutinė skaičiavimų (modelio) procentinė paklaida – 0,16 %, standartinis nuokrypis – 13,77 % (2.28 pav.). Tai rodo, kad net ir patikslinus Hirsch modelio koeficientus nustatyta sąlyginai didelė tamprumo modulio skaičiavimo paklaida. Nepaisant to, kad procentinės paklaidos variacija yra gana didelė, apskaičiuotų ir išmatuotų dinaminių tamprumo modulių procentinės paklaidos Normaliojo skirstinio hipotezė nebuvo atmesta, nes P-vertė ($P = 0,173$) daugiau nei $\alpha = 0,05$.

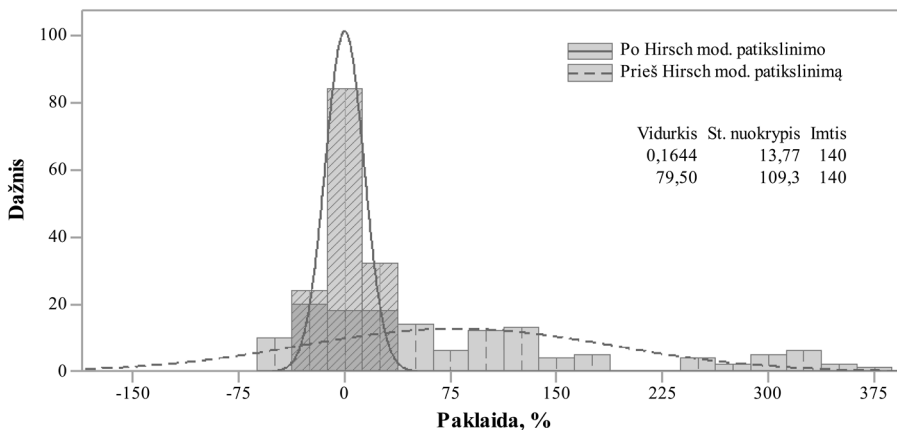
Iš tamprumo modulio procentinės paklaidos (prie 1 Hz) prieš ir po Hirsch modelio patikslinimo histogramos (2.28 pav.) matomas ženklus procentinės paklaidos vidurkio ir išsibarstymo skirtumas. Atlikus F testą procentinių paklaidų po Hirsch modelio patikslinimo dispersija ženkliai skiriasi nuo pradinių modelių gautų paklaidų ($p < 0,0001$). Patikslinus Hirsch modelį paklaidų

dispersija nustatyta žymiai mažesnė (2.28 pav.), todėl teigiama, kad patikslinti Hirsch modelio koeficientai užtikrins tikslesnę tamprumo modulio apskaičiavimą ir yra tinkamesni naudoti mišiniams, pagamintiems pagal šalies norminius dokumentus.



2.27 pav. Asfalto mišinių $E^*_{H(\text{calc.})}$ ir $E^*_{(\text{meas.})}$ procentinės paklaidos (prie 1 Hz): a) sklaidos diagrama; b) stačiakampė diagrama

Fig. 2.27. The percentage error of $E^*_{H(\text{calc.})}$ and $E^*_{(\text{meas.})}$ of asphalt mixtures (at 1 Hz): a) scatter plot; b) boxplot



2.28 pav. Dinaminio tamprumo modulio procentinės paklaidos histograma (prie 1 Hz) prieš ir po Hirsch modelio patikslinimo

Fig. 2.28. The histogram of dynamic modulus percentage error (at 1 Hz) determined before and after Hirsch model calibration

2.3.2. Asfalto mišinių dinaminio tamprumo modulio apskaičiavimas taikant patikslintą Hirsch modelį

Taikant Hirsch modelį su patikslintais koeficientais (2.6 lentelę) apskaičiuoti asfalto mišinių tamprumo moduliai (toliau – $E^*_{H(calc.)}$) pagal bituminio rišiklio šlyties modulį prie temperatūrų nuo 10 °C iki 82 °C ir dažnių nuo 0,156 iki 15,6 Hz. Norint palyginti apskaičiuotus ir nustatytus E^* , jie turi atitikti tas pačias dažnio ir temperatūrų sąlygas. Taikant superpozicijos principą bei suformavus kompleksinę tamprumo modulio kreivę prie referencinės temperatūros apskaičiuojamas tamprumo modulis prie bet kurio dažnio ar temperatūros.

Vadovaujantis šia teorija, E^* apskaičiuoti taikant Hirsch modelį su patikslintais koeficientais pertvarkyti pagal Gordon-Shaw metodą pasirinkus 22 °C referencinę temperatūrą (toliau – T_{ref}). Gordon-Shaw metodas pasižymi neapribotu (*angl. unconstrained*) atstumo tarp skirtingų temperatūros taškų minimizavimu (1.4.2 skyriuje). Šiuo metodu atliktas pertvarkymas perslenka kiekvieną E^* tašką horizontaliai kryptimi atitinkamo T_{ref} perslinkimo koeficiento a_T atžvilgiu. Kadangi, taškinės diagramos taikymas atliekant tolimesnius skaičiavimus yra komplikutas, perslinktoms taškinėms $E^*_{H(calc.)}$ vertėms pritaikoma sigmoidinė Richards funkcija (1.4.2 poskyryje).

Sigmoidinės funkcijos pritaikymas atliktas minimizuojat standartinę kvadratinės paklaidos sumą (SSSE) netiesinės optimizacijos metodu (Excel SOLVER GRG Nonlinear) keičiant Richards funkcijos kintamuosius: α , β , γ , δ , λ . Optimizavimas atliktas taikant vieną ribojimą $\lambda > 0$ ir apėmė du etapus: pirmasis – pritaikant pradines (*angl. seed*) kintamųjų vertes pagal (Rowe et al. 2009) $\alpha = 1$, $\beta = 1$, $\gamma = -1$, $\delta = 0$ ir $\lambda = 1$; antrasis – suapvalinus apskaičiuotas kintamųjų vertes iki šimtųjų. Atitinkama metodika pritaikyta ir fazės kampo funkcijos nustatymui pagal (Rowe 2009). Perslinkimo koeficiento a_T vertėms pritaikyta kvadratinė funkcija su trimis kintamaisiais.

Funkcijų pritaikymo metu nustatytos determinacijos koeficientas (R^2) ir standartinės paklaidos santykis (Se/Sy). Perslinkimo koeficiento a_T , kompleksinės tamprumo modulio E^* ir fazės kampo ϕ kreivėms pritaikytų charakterizuojančių funkcijų tinkamumo rodikliai pateikti 2.7 lentelėje. Analizuojant kreivių pritaikymo tinkamumo rodiklius, matoma, kad jie tenkina 1.4 lentelėje apibrėžtus optimalaus pritaikymo reikalavimus, t. y. visais atvejais $R^2 \geq 0,90$ ir $Se/Sy \leq 0,35$. Lyginant nustatytus tinkamumo rodiklius tarpusavyje, pastebima, kad fazės kampo kreivė turėjo mažiausią suderinamumą su nustatytais reikšmėmis.

Skaiciavimais nustatyti kompleksines kreives apibūžiantys koeficientai pateikti priede D.

2.7 lentelė. Perslinkimo koeficiento a_T , kompleksinės tamprumo modulio E ir fazės kampo φ kreivėms pritaikytų charakterizuojančių funkcijų tinkamumo rodikliai

Table 2.7. The goodness-of-fit parameters of fitted functions characterized the shifting factor a_T , complex modulus E^* and phase angle φ curves

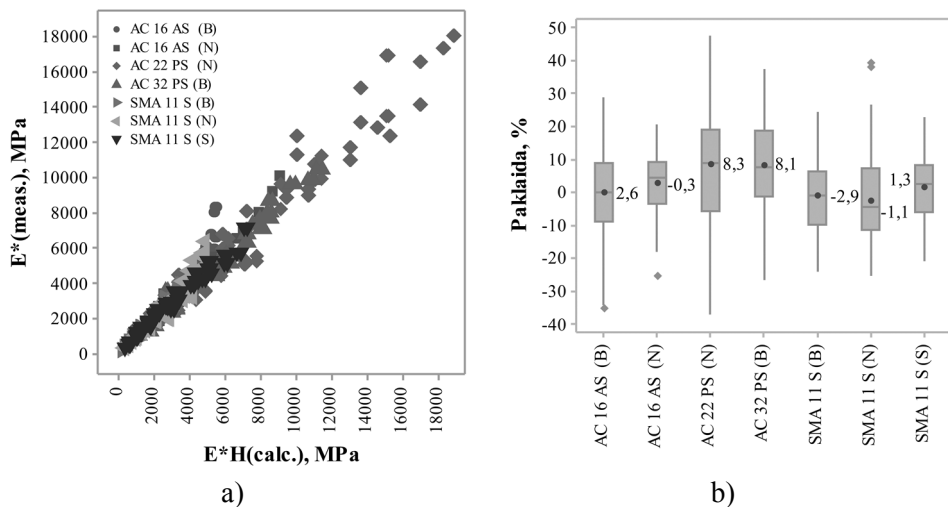
Mišinys	Sendinimas	Bitumas	Bandymas	Funkcija (formulė)					
				a_T		$E^*_{H(calc.)}$		$\varphi_{H(calc.)}$	
				R^2	Se/Sy	R^2	Se/Sy	R^2	Se/Sy
SMA 11 S	N	PMB 45/80-55	1	0,999	0,031	0,999	0,011	0,968	0,181
			2	0,999	0,031	0,999	0,010	0,968	0,182
AC 16 AS	N	50/70	1	0,999	0,026	0,999	0,028	0,991	0,098
			2	0,999	0,027	0,999	0,028	0,990	0,099
AC 22 PS	N	50/70	1	0,999	0,025	0,999	0,026	0,999	0,032
			2	0,999	0,025	0,999	0,024	0,999	0,032
SMA 11 S	S	PMB 45/80-55	1	0,999	0,026	0,997	0,053	0,998	0,042
			2	0,999	0,028	0,997	0,054	0,998	0,044
SMA 11 S	B	PMB 45/80-55	1	0,999	0,032	0,999	0,031	0,989	0,105
			2	0,999	0,027	0,999	0,032	0,989	0,106
AC 16 AS	B	50/70	1	0,999	0,028	0,999	0,022	0,977	0,154
			2	0,999	0,024	0,999	0,022	0,978	0,149
AC 32 PS	B	50/70	1	0,999	0,031	0,999	0,013	0,996	0,068
			2	0,999	0,033	0,999	0,014	0,996	0,067

2.3.3. Patikslinto Hirsch modelio tinkamumo asfalto mechaninių savybių apskaičiavimui pagrindimas

Taikant, šias kompleksines kreives perskaičiuoti tamprumo moduliai į eksperimentiniais bandymais taikytas sąlygas (2.1.2 poskyryje). Nustatyti rezultatai palyginti su eksperimentu nustatytais E^* moduliais (2.29 pav. a). Apskaičiuotos skaičiavimo paklaidos kiekvienam mišiniui (2.29 pav. b). Iš sklaidos diagramos (2.29 pav. a) matoma, kad patikslinus koeficientus ir apskaičiavus $E^*_{H(calc.)}$ prie 0,1–7 Hz ir 4–34 C pastebima tiesinė priklausomybė $E^*_{(meas.)}$ ir kinta ribose nuo 192 iki 18 800 MPa.

Apskaičiuotos procentinės paklaidos (pagal 2.6 formulę) lyginant perskaičiuotas $E^*_{H(calc.)}$ modulio vertes su patikslintais koeficientais ir visas eksperimentu nustatytas vertes. Analizuojant skirtingų asfalto mišinių $E^*_{H(calc.)}$ ir $E^*_{(meas.)}$ procentinės paklaidos stačiakampę diagramą (2.29 pav. b) nustatyta, jog asfalto pagrindo sluoksnių mišiniai turėjo didžiausias vidutines paklaidas, kurios siekė 8,3 ir 8,1 atitinkamai AC 22 PS (N) ir AC 32 PS (B).

Asfalto mišinių $E^*_{H(calc.)}$ ir $E^*_{(meas.)}$ procentinės paklaidos atitikimo normaliniam skirstiniui analizės rezultatai pateikti 2.8 lentelėje ir 2.30 a) paveiksle.



2.29 pav. Asfalto mišinių $E^*_{H(calc.)}$ ir $E^*_{(meas.)}$ palyginimas: a) sklaidos diagrama; b) stačiakampė diagrama

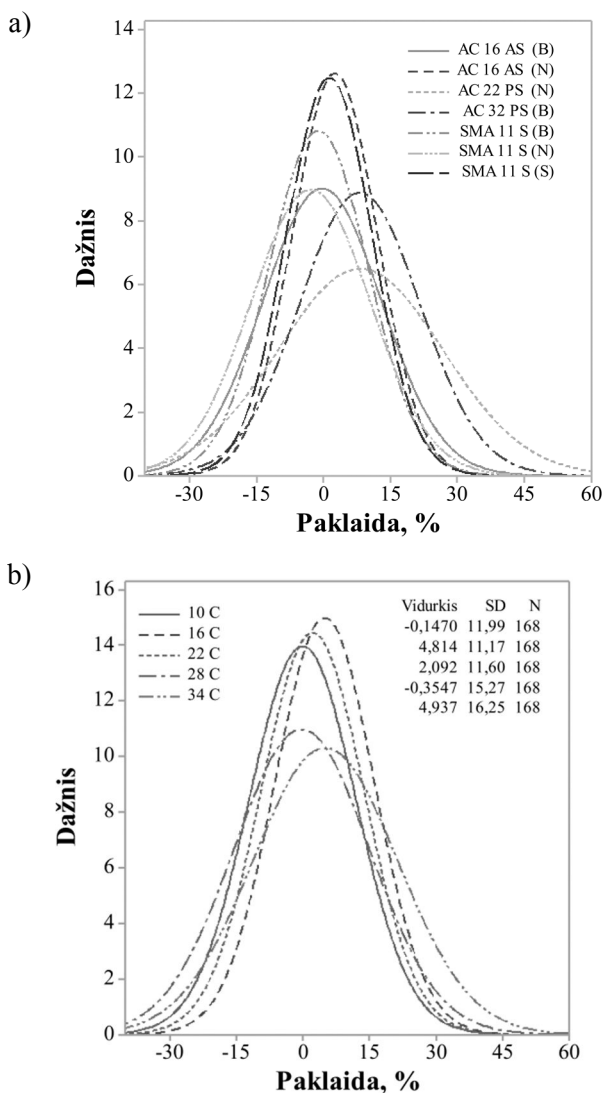
Fig. 2.29. The percentage error of $E^*_{H(calc.)}$ and $E^*_{(meas.)}$ of asphalt mixtures: a) scatter plot; b) boxplot

2.8 lentelė. Asfalto mišinių $E^*_{H(calc.)}$ ir $E^*_{(meas.)}$ procentinės paklaidos atitikimo normaliniam skirstiniui analizės rezultatai

Table 2.8. The Normal distribution analysis of percentages error of $E^*_{H(calc.)}$ and $E^*_{(meas.)}$ comparison of asphalt mixtures

Asfalto mišinio rūšis (sendinimas)	Vidurkis μ	Standartinis nuokrypis S_T	Imtis N	Anderson- Darling kriterijus AD	P-vertė	Esant 90 %	
						Min	Max
AC 16 AS (N)	2,55	9,49	120	0,670	0,078	-14,7	19,8
AC 16 AS (B)	-0,33	13,30	120	0,210	0,857	-24,5	23,8
AC 22 PS (N)	8,29	18,48	120	0,459	0,258	-25,2	41,8
AC 32 PS (B)	8,10	13,50	120	0,765	0,045	-16,4	32,6
SMA 11 S (N)	-2,89	13,35	120	0,637	0,094	-27,1	21,3
SMA 11 S (B)	-1,14	11,07	120	0,592	0,120	-21,2	18,9
SMA 11 S (S)	1,30	5,60	120	0,456	0,263	-8,9	11,5
Vidutinė paklaida:	2,27	12,11				-19,7	24,3

Iš 2.8 lentelės matoma, kad Hirsch modelio su patikslintais koeficientais procentinių paklaidų skirstinio normalumo hipotezės atitikimo analize nustatyta, kad asfalto mišinių procentinės paklaidos skirstiniai turi normaliojo skirstinio požymių. Nulinės H_0 hipotezės atmetimui nėra pakankamai įrodymų, nes visais atvejais P-vertės didesnės už $\alpha = 0,05$ (2.8 lentelė).



2.30 pav. Asfalto mišinių $E^*_{H(calc.)}$ ir $E^*_{(meas.)}$ procentinės paklaidos normaliniai skirstiniai: a) pagal asfalto mišinio rūšį; b) pagal temperatūrą

Fig. 2.30. The normal distribution of percentages error of $E^*_{H(calc.)}$ and $E^*_{(meas.)}$ comparison of asphalt mixtures according to: a) mixture type; b) temperature

Analizuojant normalinius asfalto mišinių tamprumo modulių paklaidų skirstinius (2.30 pav. a) matoma, kad mažiausias paklaidos sklaida nustatyta AC 16 AS (N) ir SMA 11 S (S). Tai rodo, kad šiems mišiniams Hirsch modeliu

su patikslintais koeficientais apskaičiuoti tamprumo moduliai artimiausi eksperimentu išmatuotoms vertėms. Mažiausias tikslumas ir didžiausia procentinės paklaidos sklaida nustatyta AC 22 PS (N) ir AC 32 PS (B) asfalto mišiniams.

Iš asfalto mišinių $E_{H(calc.)}^*$ ir $E_{(meas.)}^*$ procentinės paklaidos normalinio skirstinio pagal temperatūrą (2.30 pav. b) matoma, kad didžiausią tikslumą ir mažiausią paklaidos sklaidą turėjo tamprumo moduliai, nustatyti prie 16 °C ir 22 °C. Tai rodo, kad procentinės paklaidos iš dalies priklausė nuo asfalto mišinių bandymų tikslumo. Matoma, kad esant aukštoms 28 °C ir 34 °C bandymų temperatūroms nustatytas mažiausias tikslumas ir didžiausia paklaidos sklaida. Vertinant atliktus tyrimus ir šiuos paklaidų rezultatus rekomenduojama apdairiau nustatyti tiesiškai tampriai klampias ribas ir apkrovas bandymo metu.

Studento dviejų bandinių bandymo (T-testu) tikrinta $E_{H(calc.)}^*$ ir $E_{(meas.)}^*$ dispersijų (σ_D) lygybė, t. y. ar lyginamos imtys yra priklausomos. Asfalto mišinių $E_{H(calc.)}^*$ ir $E_{(meas.)}^*$ Studento dviejų bandinių statistinės analizės rezultatai pateikti 2.9 lentelėje. Iš 2.9 lentelės matoma, kad nėra pakankamai įrodomų atmesti nulinę hipotezę, kad dviem metodais nustatytų dinaminio tamprumo modulių vidurkiai yra lygūs, o imtys priklausomos.

2.9 lentelė. Asfalto mišinių $E_{H(calc.)}^*$ ir $E_{(meas.)}^*$ Studento dviejų bandinių statistinės analizės rezultatai

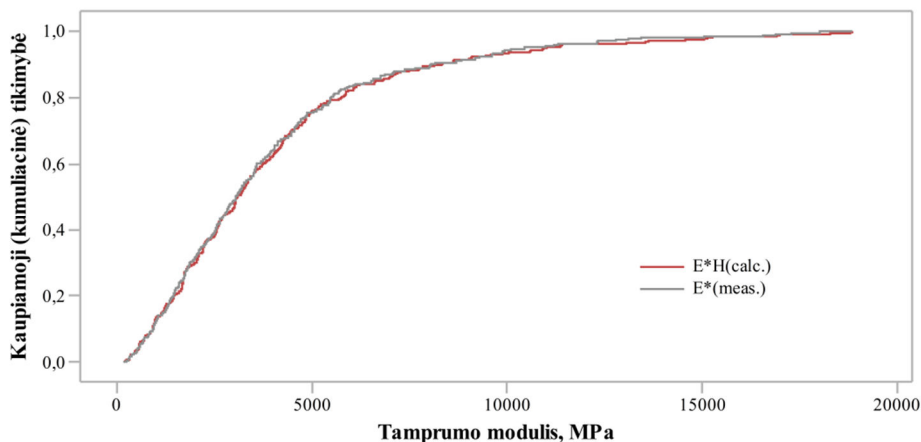
Table 2.9. The Student's t-test results of two samples of $E_{H(calc.)}^*$ and $E_{(meas.)}^*$

Tikrinamos dispersijos	Vidurkis, μ	Kintamųjų skaičius, N	Standartinis nuokrypis, S_t	Standartinio nuokrypio paklaida
$\sigma_D(E_{H(calc.)}^*)$	3970	840	3384	117
$\sigma_D(E_{(meas.)}^*)$	3872	840	3221	111
Skirtumas = $\mu(E_{H(calc.)}^*) - \mu(E_{(meas.)}^*) = 98$				
Skirtumo patikimumo indeksas CI 95%: (-218; 414)				
Imčių skirtumo T-Test = 0 (prieš \neq): T-vertė = 0,61; P-vertė = 0,544; DF = 1673				

Asfalto mišinių dinaminio tamprumo modulio apskaičiuoto taikant Hirsch modelį su patikslintais koeficientais ir nustatyto eksperimentiniais bandymais atitikimas pagrįstas Kolmogorov-Smirnov (K-S) dviejų bandymų testu (2.31 pav.). Kolmogorov-Smirnov dviejų bandinių testo nulinė hipotezė: skirtingais metodais nustatytos vertės kilo iš populiacijos su tokia pačiu skirstiniu. Nulinės hipotezė atmetama jei $K - S_T > K - S_{crit.}$. Nustatyta, $K - S_T = 0,030 < K - S_{crit.} = 0,066$, o $P = 0,81$, todėl nėra pakankamai įrodymų

teigti, jog apskaičiuoti ir nustatyti dinaminio tamprumo moduliai yra ženkliai skirtingi.

Apibendrinant pateiktą duomenų analizę galima teigti, kad apskaičiuotos $E^*_{H(calc.)}$ vertės pagal Hirsch modelį gali būti taikomos dangos konstrukcijos reakcijos į apkrovą ir funkcionavimo vertinimui. Tačiau reikia įvertinti Hirsch modelio vidutinę skaičiavimo paklaidą 2,3 % su 12,1 standartiniu nuokrypiu. Patikslintų Hirsch modelio koeficientų universalumo požymiai nebuvo tirti, todėl jų taikymas kitiems asfalto mišiniams turi būti apgalvotas įvertinant skaičiavimo paklaidų tikimybę.



2.31 pav. Vertikalojo skirtumo tarp $E^*_{H(calc.)}$ ir $E^*_{(meas.)}$ modulių subpopuliacijos skirstinių funkcijų grafikas

Fig. 2.31. The plot of vertical displacement between $E^*_{H(calc.)}$ and $E^*_{(meas.)}$ modulus subpopulation distribution functions

2.4. Asfalto mišinių tampriai klampių savybių vertinimas

Tampriai klampių medžiagų elgsena apibūdinama reologiniais modeliais (1.4.1 poskyryje), kurie nusako įtempimų ir deformacijų kitimą medžiagoje. Reologiniai modeliai tampriai klampioms savybėms įvertinti taikomi pagal dangos konstrukcijos projektavimui taikomą skaičiuojamąją programą.

Tačiau dažniausiai dangos konstrukcijos reakcijos skaičiavimo kompiuterinėse programose (ABAQUS, ANSYS, KENPAVE ir pan.) įdiegti reologiniai modeliai, kuriuose tampriai klampios savybės apibūtos dinaminio tamprumo modulio kitimu laiko atžvilgiu (arba Jungo relaksacijos moduliui).

Dinaminio tamprumo modulio nustatyto prie ciklinės apkrovos konvertavimas į laiko domeną atliekamas taikant generalizuotą Maxwell (arba Wiechert) modelį (*angl. Generalized Maxwell or Wiechert model*) (Schapery *et al.* 1999; Park *et al.* 1999). Nustačius kompleksinę dinaminio tamprumo modulio kreivę galima pertvarkyti duomenis į bet kurį reologinį modelį.

BRRC (2000) metai atliko skirtingų dangos konstrukcijos skaičiavimo programų analizę. Tyrimo metu nustatyta, kad tiksliausiai dangos konstrukcijos reakciją į judančią apkrovą, įvertinant tampriai klampias asfalto sluoksnių savybes, apskaičiuoja VISCOROUTE programa (BRRC 2000). VISCOROUTE dangos konstrukcijos reakcijos į apkrovą skaičiavimo programoje įdiegtas Huet-Sayegh modelis (Huet 1963; Sayegh 1965), leidžiantis tiesiogiai integruoti tampriai klampias asfalto mišinių savybes (Duhamel *et al.* 2005; Chabot *et al.* 2010). Ši programa taikoma nestandžių dangos konstrukcijų projektavimui Prancūzijoje (Corté *et al.* 1996).

Taikant apskaičiuotas asfalto mišinių dinaminio tamprumo modulio $E^*_{H(calc.)}$ kompleksines kreives nustatyti asfalto sluoksnių tampriai klampią elgseną apibūrinantys Huet-Sayegh modelio koeficientai (2.10. lentelė). Plačiau Huet-Sayegh modelis, jo samprata ir koeficientai aprašyti 1.4.3 poskyryje.

2.10 lentelė. Ištirtų asfalto mišinių Huet-Sayegh modelio dedamosios kai referencinė temperatūra 20 °C

Table 2.10. The coefficients for Huet-Sayegh model at 20 °C reference temperature

Asfalto mišinys (sendinimas)	E_0	E_∞	δ	k	h	A_0	A_1	A_2
SMA 11 S (N)	57	5627	3,53	0,42	0,77	7,08	-0,370	0,00215
AC 16 AS (N)	1101	13961	9,34	0,40	0,40	6,80	-0,328	0,00074
AC 22 PS (N)	202	25483	4,77	0,36	0,82	7,11	-0,364	0,00186
SMA 11 S (S)	63	13233	11,69	0,37	0,37	6,90	-0,343	0,00130
SMA 11 S (B)	43	5874	8,21	0,36	0,36	7,09	-0,361	0,00177
AC 16 AS (B)	82	6038	1,00	0,39	0,39	7,03	-0,342	0,00091
AC 32 PS (B)	4	21747	7,10	0,31	0,31	7,09	-0,355	0,00148

2.5. Antrojo skyriaus išvados

Disertacijoje iškeltam tikslui įgyvendinti atliktas eksperimentinis tyrimas, apimantis septynių asfalto mišinių ir jų sudedamųjų dalių fizinių ir mechaninių savybių nustatymą. Apibendrinant antrajame skyriuje pateiktus eksperimentinio tyrimo ir analizės rezultatus galima teigti, kad:

1. Iš eksploatuojamo kelio paimti asfalto mišinio ėminiai gali būti naudojami faktinėms mechaninėms savybėms nustatyti ir patikrinti, atliekant bandymus tiek su asfalto mišiniais, tiek ir regeneravus jų bituminį rišiklį. Šios mechaninės savybės reprezentuoja asfalto sluoksnių amžių ir ribines apkrovas bei gali būti naudojamos liekamajam dangos konstrukcijos amžiui prognozuoti.
2. Remiantis bitumo dinaminio šlyties modulio rezultatais galima teigti, kad bitumui senėjant ribinė atsparumo provėžoms temperatūra didėja. Nustatyta, 4,5 °C žemesnė ribinė atsparumo provėžoms temperatūra polimerais modifikuoto bitumo po RTFOT lyginant su tos pačios rūšies bitumu regeneruotu iš 8-erius metus eksploatuoto kelio dangos. Šis pokytis rodo, kad eksploatacijos metu bitumas veikiamas oksidacijos kietėja, todėl ribinė temperatūra didėja. Analizuojant ribinę bitumo atsparumo nuovargiui temperatūrą matoma tendencija, kad bitumui senėjant ribinė temperatūra mažėja. Nustatyta, 2,6 °C žemesnė ribinė atsparumo nuovargiui temperatūra polimerais modifikuoto bitumo po RTFOT lyginant su tos pačios rūšies bitumu po regeneravimo. Nustatyta, kad ribinė atsparumo nuovargiui temperatūra sumažėjo per 4,8 °C nemodifikuotam bitumui 50/70.
3. Netiesioginio tempimo bandymu nustatyto dinaminio tamprumo modulio rezultatai parodė, kad asfalto mišinių, paimtų iš 8-erius metus eksploatuojamo kelio dangos modulio vertės yra mažesnės už tos pačios rūšies 2015 metais pagamintų asfalto mišinių. Nustatytas didžiausias procentinis dinaminio modulio pokytis asfalto viršutinio sluoksnio mišiniui SMA 11 S (PMB 45/80-55), šio mišinio modulis vidutiniškai 44 % mažesnis lyginant su tos pačios rūšies nauju mišiniu. Didelis dinaminio modulio pokytis nustatytas ir asfalto pagrindo sluoksnių mišiniams, asfalto mišiniui AC 32 PS (50/70) nustatytas vidutiniškai 35 % mažesnis dinaminis modulis nei AC 22 PS (50/70). Mažiausias dinaminio modulio skirtumas nustatytas asfalto apatinio sluoksnio mišiniui AC 16 AS (50/70), šio mišinio modulis vidutiniškai 9 % mažesnis lyginant su tos pačios rūšies nauju mišiniu.
4. Būtina dinaminio tamprumo ir šlyties moduliams nustatyti tiesiškai tampriai klampias ribas (LVE). Siekiant tiksliau įvertinti LVE ribas rekomenduojama atlikti bandymus prie ne mažiau kaip 2-jų dažnių (didžiausio ir mažiausio) ir 3-jų temperatūrų, ne mažiau kaip po 3-is bandinius konkrečioms sąlygoms. Šlyties ir tamprumo bandymams priimti ne mažiau kaip 50 % mažesnes deformacijų (arba įtempimų) vertes nuo nustatytos LVE ribos. Tai aktualu ypač atliekant bandymus prie aukštų temperatūrų, nes netinkamai priimtoms bandymo sąlygoms gali

nulemti klampiai plastišką mišinio reakciją į apkrovą ir sukelti rezultatų paklaidų.

5. Apskaičiuotos pagal Hirsch modelį su patikslintais koeficientais dinaminio tamprumo modulio vertės gali būti taikomos dangos konstrukcijos reakcijai į apkrovą ir funkcionavimui vertinti. Tačiau reikia įvertinti Hirsch modelio vidutinę skaičiavimo paklaidą 2,3 % su 12,1 standartiniu nuokrypiu. Patikslintų Hirsch modelio koeficientų universalumo požymiai nebuvo tirti, todėl jų taikymas kitiems asfalto mišiniams turi būti apgalvotas įvertinant skaičiavimo paklaidų tikimybę.
6. Eksperimentinio tyrimo metu nustatyti ir apskaičiuoti asfalto mišinių dinaminio tamprumo modulio bei jo fazės kampo duomenys pertvarkyti į Huet-Sayegh modelį, kuris apibrėžia asfalto mišinio tampriai klampią reakciją (kitimą) į judančią apkrovą.

Nestandžios dangos konstrukcijos modeliavimas ir funkcionavimo prognozavimas

Šiame skyriuje atliktas naujos ir eksploatuojamos nestandžios dangos konstrukcijos modeliavimas įvertinant asfalto tamprias ir tampriai klampias savybes. Nustatyti šių dviejų dangos konstrukcijų reakcijos parametrai (įtempiai ir deformacijos) nuo statinės ir judančios standartinės 10-ies t svorio ašinės apkrovos esant pastoviai ir kintamai dangos temperatūrai. Kiekvienam modeliavimo atvejui nustatytos ribinės (leistinosios) apkrovos taikant dangos konstrukcijos funkcionavimo modelius, kurie apibrėžia: asfalto pagrindo sluoksnio atsparumą nuovargiui, nesurištų pagrindo sluoksnių ir žemės sankasos atsparumą liekamosioms deformacijoms.

Analize nustatytas asfalto tamprių ir tampriai klampių savybių poveikis dangos konstrukcijos funkcionavimui. Nustatyta, kad įvertinus tampriai klampias savybes nuo judančios apkrovos galima optimizuoti dangos konstrukcijos sluoksnius išlaikant panašų dangos konstrukcijos funkcionavimą. Atliktas ekonominis vertinimas taikant skirtingus dangos konstrukcijos projektavimo metodus.

Skyriaus tematika paskelbti straipsniai: Vaitkus *et al.* (2012), Vaitkus *et al.* (2014), Vaitkus *et al.* (2014), Žiliūtė *et al.* (2016).

3.1. Asfalto dangos konstrukcijos reakcijos į apkrovą skaičiavimo įvesties duomenys

Asfalto sluoksnių tamprių ir tampriai klampių savybių įtakai dangos konstrukcijos funkcionavimui nustatyti analizuojami trimis skirtingais metodais apskaičiuotų dviejų dangos konstrukcijų reakcijos į apkrovą rezultatai. Dangų konstrukcijos sluoksnių storiai priimti atitinkamai pagal Eksperimentinių dangų konstrukcijų bandomojo ruožo (toliau – E DK BR) 12-tą dangos konstrukciją (3.1 pav.). Skaičiuojamosios dangos konstrukcijos yra vienodos bendrojo storio bei sluoksnių storių atžvilgiu, taip pat sluoksnių rūšimi, tačiau skiriasi asfalto mišinių amžius, sudėtis ir mechaninės savybės. Skaičiavimai atlikti dviem dangos konstrukcijoms:

- DK I – kai taikomos asfalto sluoksnių mechaninės savybės nustatytos iš naujų, nesendintų asfalto mišinių – SMA 11 S (N), AC 16 AS (N) ir AC 22 PS (N) – reprezentuoja naujai įrengtą dangos konstrukciją;
- DK II – kai taikomos asfalto sluoksnių mechaninės savybės nustatytos iš asfalto mišinių paimtų iš E DK BR – SMA 11 S (B), AC 16 AS (B) ir AC 22 PS (B) (žr. 2 skyrių) – reprezentuoja 8 metus eksploatuotą dangos konstrukciją, kuriai per šį laikotarpį suteikta apie 0,6 mln. ekvivalentinių 10 t svorio ašių apkrovų (Žiliūtė *et al.* 2016).

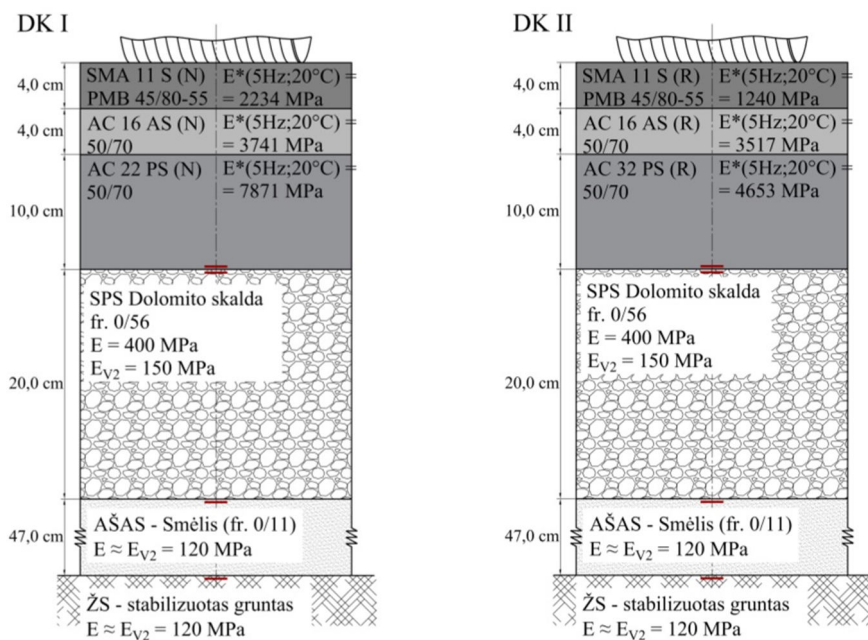
Daroma prielaida, jog visais skaičiavimo atvejais nesurišti pagrindo sluoksniai ir žemės sankasa yra tamprūs. Dolomito skaldos (fr. 0/56) pagrindo sluoksnio (toliau – SPS) tamprumo modulis priimtas pagal analogiškos skaldos eksperimentais nustatytą tamprumo modulį (Vaitkus *et al.* 2015). Apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio (toliau – AŠAS) ir žemės sankasos (toliau – ŽS) grunto tamprumo modulis atitinka štampu (pagal LST 1360.5:1995) deformacijos modulio E_{V2} vertes, nustatytas E DK BR įrengimo metu („Automobilių kelių eksperimentinių dangų konstrukcijų bandomojo ruožo įrengimas“ Bandymų protokolai, rezultatai, ataskaitos I tomas, 2007). Skaičiavimams taikytos nesurištų pagrindo sluoksnių tamprumo ir deformacijos modulių vertės pateiktos 3.1 paveiksle.

Taip pat daroma prielaida, kad visais modeliavimo atvejais Puasono koeficientas yra pastovus, t. y. skersinių ir išilginių deformacijų santykis nepriklauso nuo drėgmės ir temperatūros. Modeliavimui taikytos teorinės Puasono koeficiento vertės (1.4.2 poskyris): asfalto sluoksniams – 0,35; nesurištiems pagrindo sluoksniams ir žemės sankasai – 0,45.

Dangos konstrukcijos modeliavimas atliktas trimis būdais, kurie reprezentuoja skirtingą asfalto sluoksnių mechaninių savybių interpretavimą:

- 1) SK I – dangos konstrukcijos reakcijos nuo statinės apkrovos skaičiavimas taikant asfalto sluoksnių dinaminį tamprumo modulį prie standartinės

- +20 C temperatūros. Šio skaičiavimo etapo dangos konstrukcijos tamprumo ir dinaminiai tamprumo moduliai pateikti 3.1 paveiksle.
- 2) SK II – dangos konstrukcijos reakcijos nuo statinės apkrovos skaičiavimas įvertinant temperatūros kitimą asfalto dangoje ir taikant kompleksinį tamprumo modulį prie aplinkos temperatūros intervalų (3.2 pav.). Skaičiavimams taikyti asfalto dinaminiai tamprumo moduliai prie skirtingų temperatūrų intervalų pateikti 3.1 lentelėje.
 - 3) SK III – dangos konstrukcijos reakcijos nuo judančios apkrovos skaičiavimas įvertinant tampriai klampias asfalto sluoksnių savybes, taikant Huet-Seyegh modelį ir nustatytus koeficientus dinaminio tamprumo modulio kitimo laiko atžvilgiu apibrėžimui. Šio skaičiavimo etapo Huet-Seyegh modelio koeficientai pateikti 2.7 lentelėje.



3.1 pav. Dangos konstrukcijos schemas ir analizės taškai: DK I – taikant naujus asfalto mišinius; DKII – taikant mišinius iš 8-erių metų eksploatuotos dangos konstrukcijos

Fig. 3.1. The pavement structures and analysis points: DK I – with new asphalt mixtures; DKII – with mixtures from 8 years old pavement

Dangos konstrukcijos reakcija į apkrovą apskaičiuota taikant daugiasluoksniškumo teorija pagrįstomis kompiuterinėmis programomis MNLAYER (Khazanovich *et al.* 2008) ir VISCOROUTE2 (Chabot *et al.* 2010).

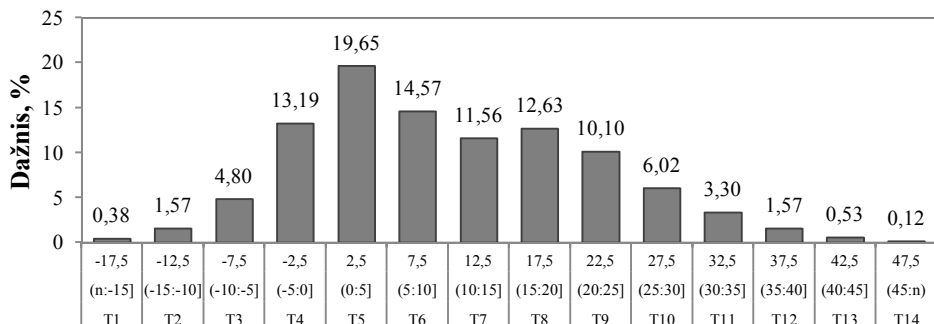
Pirmieji du dangos konstrukcijų skaičiavimai atlikti su MNLAYER įvertint dangos konstrukcijų reakciją nuo statinės apkrovos, trečiasis – VISCOROUTE2 įvertinant judančią/dinaminę apkrovą.

Automobilių transporto sukeltos apkrovos sąlygos priimtose atsižvelgiant į E DK BR eismo intensyvumą, transporto priemonių sudėtį ir važiavimo greitį (Vaitkus *et al.* 2012), skaičiavimai atlikti įvertinant:

- vidutinį transporto priemonių važiavimo greitį – 58 km/h (Gillespie *et al.* 1992) – penkių ašių sunkvežimis važiuodamas šiuo greičiu generuoja dangai ~ 5 Hz apkrovą (t. y. $\approx 0,035$ s);
- pavienes 10 t svorio ašis (t. y. rato apkrova $\approx 49,82$ kN);
- rato ir dangos kontakto plotą – apskritimo formos, kurio spindulys $R = 150$ mm (t. y. kontakto plotas $A \approx 70\,686$ mm²);
- slėgį padangoje – 850 kPa (Kleizienė *et al.* 2015).

SK II skaičiavimams taikytas II-jo regiono dangos paviršiaus temperatūrų intervalų skirstinys (3.2 pav.), kuris atitinka E DK BR aplinkos ir klimato sąlygas (Vaitkus *et al.* 2015; Vaitkus *et al.* 2012). Temperatūrų kitimas DK I ir DK II asfalto sluoksniuose nustatytas pagal dangos paviršiaus temperatūrą taikant formulę 1.51 (1.4.1 poskyrį) palaipsniui gilėjant kas 10–20 mm. Taikant tiesinį interpoliavimą ir 3.1 lentelės duomenis nustatytas asfalto sluoksnio tamprumo modulio kitimas palaipsniui gilėjant. Kiekvieno intervalo temperatūrai atlikti dangos reakcijos į apkrovą skaičiavimai.

SK III dangos konstrukcijos modeliavimas atliktas programa VISCOROUTE2, taikant 2.7 lentelėje pateiktus Huet-Seyegh modelio koeficientus ir sluoksnių tankio duomenis. Dangos konstrukcijos reakcija į apkrovą nustatyta įvertinant tamptai klampias asfalto sluoksnių savybes, skaičiavimai atlikti prie 20 °C ir 16,6 m/s greičio.



3.2 pav. II-jo regiono dangos paviršiaus temperatūrų intervalų skirstinys (Vaitkus *et al.* 2015)

Fig. 3.2. The pavement surface temperature distribution of IInd region (Vaitkus *et al.* 2015)

3.1 lentelė. Asfalto sluoksnių tamprumo modulio priklausomybė nuo temperatūros
Table 3.1. The modulus of asphalt layers under different temperature

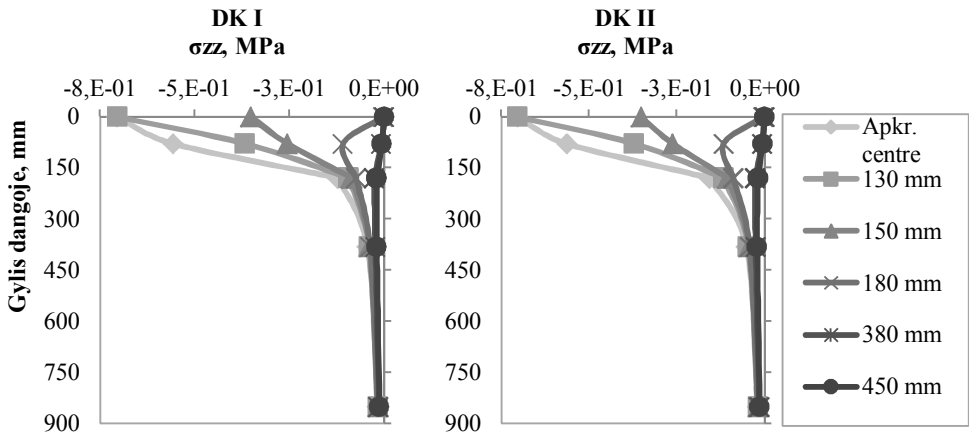
Temperatūra, °C	Asfalto sluoksnio tamprumo modulis prie 5Hz, MPa					
	DK I			DK II		
	Viršutinis	Apatinis	Pagrindo	Viršutinis	Apatinis	Pagrindo
	SMA 11 S (N)	AC 16 AS (N)	AC 22 PS (N)	SMA 11 S (B)	AC 16 AS (B)	AC 32 PS (B)
-17,5	5776	15068	26092	6384	6219	26690
-12,5	5678	13975	25152	5841	6135	22481
-7,5	5511	12606	23778	5184	6001	18575
-2,5	5241	10989	21862	4436	5795	15052
2,5	4828	9213	19347	3636	5495	11963
7,5	4245	7411	16282	2841	5077	9332
12,5	3498	5741	12868	2112	4532	7150
17,5	2655	4328	9454	1497	3875	5389
22,5	1836	3236	6428	1018	3150	4004
27,5	1161	2458	4069	673	2428	2939
32,5	690	1943	2448	440	1783	2137
37,5	404	1625	1448	291	1264	1543
42,5	246	1442	879	198	886	1111
47,5	162	1347	570	140	632	799

3.2. Asfalto dangos konstrukcijos reakcijos į apkrovą nustatymas ir funkcionavimo vertinimas

3.2.1 Dangos konstrukcijos reakcija į apkrovą įvertinant tamprias ir tampriai klampias savybes

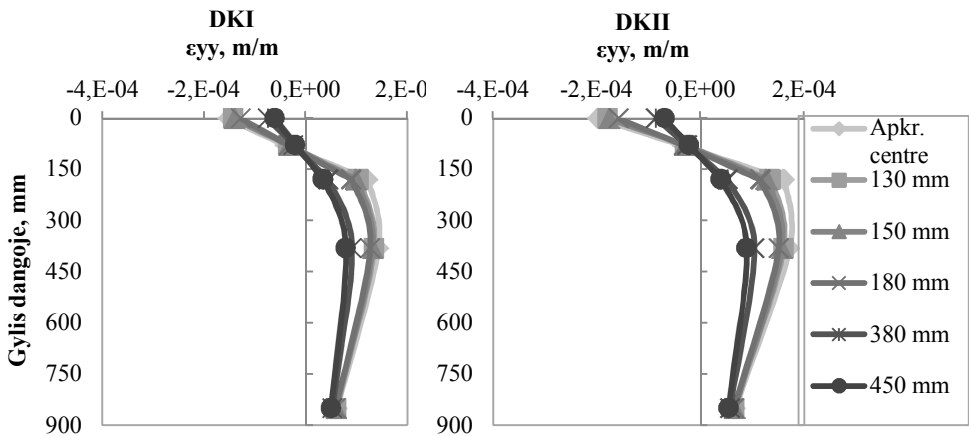
Taikant nustatytas tamprias ir tampriai klampias ištirtų asfalto mišinių savybes atlikti dangos konstrukcijos reakcijos nuo 10 t svorio ašinės apkrovos skaičiavimai trimis būdais: SK I; SK II ir SK III. Įtempimai ir deformacijos apskaičiuotos kiekviename dangos konstrukcijos sluoksnyje rato apkrovos centre ir 130, 150, 180, 380, 450 mm atstumais nuo apkrovos centro. Atsižvelgiant į RDO Asphalt 09 nustatyta, kad rato apkrovos spindulys – 150 mm.

Vertikalieji įtempimai ir horizontaliosios deformacijos dangos konstrukcijose (DK I ir DK II) nuo 10 t svorio ašinės apkrovos pagal SK I atsižvelgiant į rato apkrovos padėtį pateiktos atitinkamai 3.3 ir 3.4 paveiksluose.



3.3 pav. Vertikalieji įtempimai dangos konstrukcijoje atsižvelgiant į rato apkrovos padėtį

Fig. 3.3. The vertical stress change in pavement structure depending of distance for load center



3.4 pav. Horizontaliosios deformacijos dangos konstrukcijoje atsižvelgiant į rato apkrovos padėtį

Fig. 3.4. The horizontal strain change in pavement structure depending of distance for load center

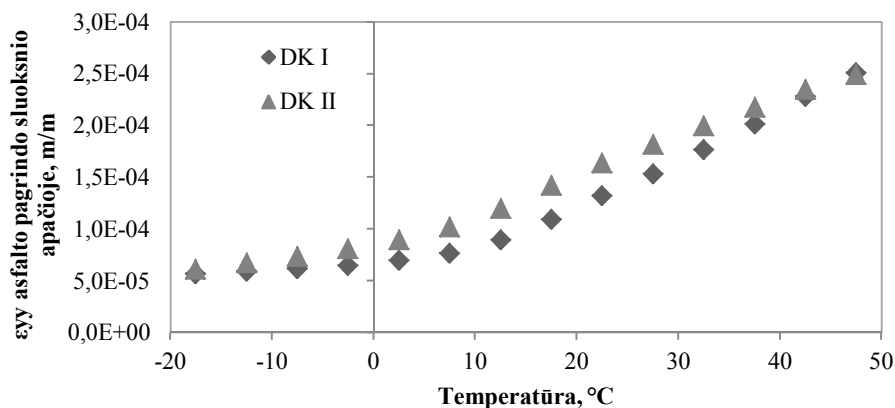
Atlikus dangos konstrukcijos reakcijos į apkrovą skaičiavimus pagal SK I matoma, kad didžiausi įtempimai nustatyti rato apkrovos centre viršutiniuose asfalto sluoksniuose. Iš 3.3 paveikslo matoma, kad vertikalieji įtempimai asfalto

sluoksniuose ženkliai variavo priklausomai nuo apkrovos padėties, tačiau asfalto sluoksnio savybės didesnės įtakos neturėjo. Vertikalieji įtempimai AŠAS ir ŽS sluoksnių viršuje yra daugiau mažiau vienodi 50 cm atstumu nuo rato padėties dangoje.

Analizuoiant horizontaliųjų deformacijų kitimą dangos konstrukcijoje (3.4 pav.) taip pat matoma, jog didžiausias poveikis dangai tenka apkrovos centre. Asfalto sluoksnių mechaninių savybių poveikis horizontalioms deformacijoms akivaizdus. Nustatyta, kad 8 metus eksploatuotoje dangos konstrukcijoje (DK II) veikiant tai pačiai apkrovai susidarė 28,5 % didesnės horizontaliosios deformacijos nei naujoje dangos konstrukcijoje (DK I).

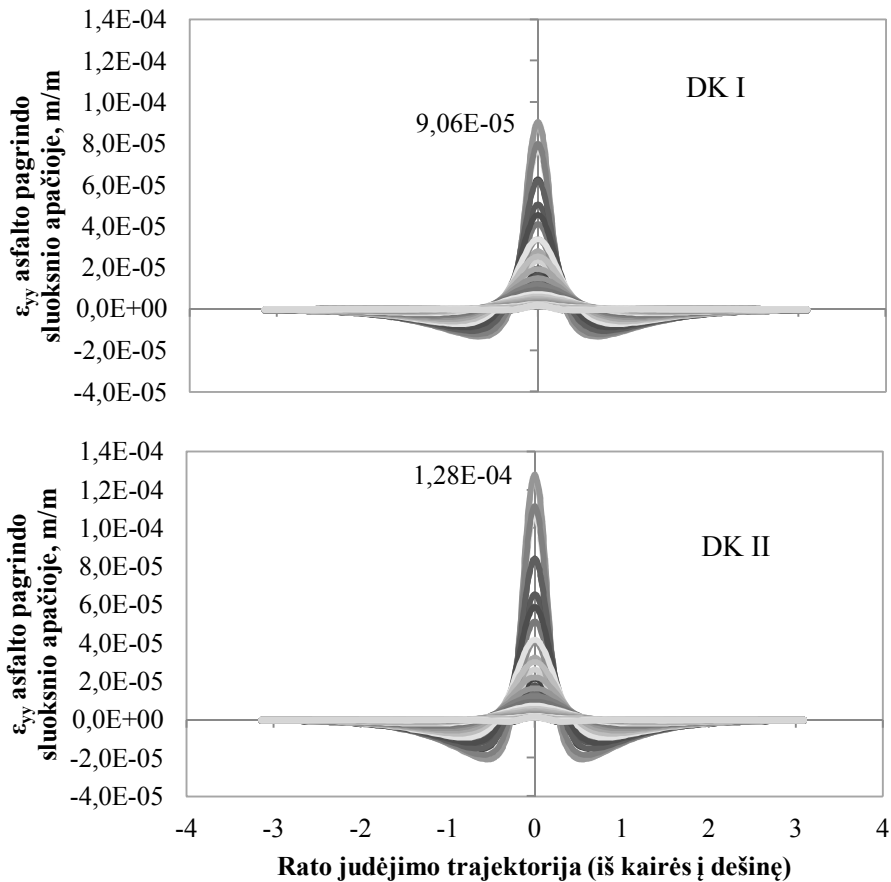
Horizontaliosios deformacijos asfalto sluoksnio apačioje (DK I ir DK II) keičiasi priklausomai nuo temperatūros (3.5 pav.). Horizontaliosios deformacijos taip pat paskaičiuotos nuo 10 t svorio ašinės apkrovos rato apkrovos centre pagal SK II. Matoma, kad didžiausias horizontaliųjų deformacijų skirtumas tarp skirtingo eksploatacijos amžiaus dangos konstrukcijų yra nuo 0 °C iki 35 °C.

Horizontaliųjų deformacijų kitimas nuo 16,6 m/s judančios apkrovos konstrukcijoje su tampriai klampių savybių asfalto danga pateiktas 3.6 pav. Čia matyti, kad įvertinus tampriai klampus asfalto sluoksnių savybes nuo judančio rato eksploatuotoje dangos konstrukcijoje (DK II) susidarė 36,9 % didesnės horizontaliosios deformacijos nei naujoje dangos konstrukcijoje (DK I).



3.5 pav. Horizontaliųjų deformacijų priklausomybė nuo temperatūros

Fig. 3.5. The horizontal strain depending on temperature



3.6 pav. Horizontaliųjų deformacijų kitimas nuo 16,6 m/s judančios apkrovos konstrukcijoje tiesiai klampia danga

Fig. 3.6. The horizontal strain change under 16,6 m/s moving load in viscoelastic pavement

3.2.2 Naujos ir eksploatuojamos dangos konstrukcijų funkcionavimo analizė ir vertinimas

Atsižvelgiant į 3.2.1 poskyryje atliktą apskaičiuotų reakcijos parametrų analizę, ribinės naujos ir 8-erius metus eksploatuojamos dangos konstrukcijų (DK I ir DK II) funkcionavimo sąlygos tikrintos didžiausių įtemimų ir deformacijų taškuose – rato apkrovos centre. Dangos konstrukcijų atsparumas nuovargiui ir liekamosioms deformacijoms tikrintas rato apkrovos centre asfalto pagrindo sluoksnio apačioje, nesurištų pagrindo sluoksnių ir žemės sankasos viršuje

(3.1 pav.). Teigiama, kad asfalto danga suyra dėl nuovargio procesų, kai asfalto sluoksnio tamprumo modulis nuo dinaminių apkrovų ciklo sumažėja per pusę.

Asfalto nuovargis paprastai nustatomas eksperimentais ir apibrėžiamas funkcija tarp ribinių apkrovų ir deformacijų. Asfalto sluoksniams nustatytos ribinės 10 t svorio ašių apkrovos taikant 1.4 formulę ir nuovargio funkcijos koeficientus AC 22 PS (50/70) asfalto sluoksniui nustatytus mokslo tiriamojo darbo metu (Vaitkus *et al.* 2015). Apskaičiuotos ribinės apkrovos asfalto nuovargio atžvilgiu pateiktos 3.7 paveiksle. Nesurištų pagrindo sluoksnių ir žemės sankasos ribinės 10 t svorio ašių apkrovos nustatytos taikant 1.5 formulę.

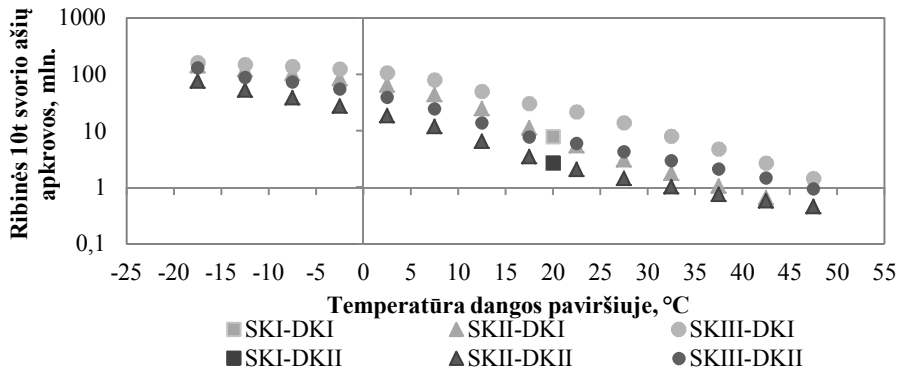
Iš dangos konstrukcijų nuovargio ribinių 10 t svorio ašinių apkrovų analizės matomas (3.7 pav.) ženklus skirtumas tarp dangos konstrukcijų DK I ir DK II, kuris patvirtintas visais skaičiavimo metodais SKI, SK II ir SK III. Šis ribinių nuovargio apkrovų pokytis rodo, kad nors 8 metus eksploatuojamoje dangoje (DK II) nuovargio požymių vizualiai nematyti (Vaitkus *et al.* 2012), tačiau apkrovų poveikis akumuluojasi ir nuovargio procesai prasidėja.

Ribinis nuovargio apkrovų skaičius kinta keičiantis temperatūrai, darančiai įtaką asfalto sluoksnių standumui ir horizontaliųjų deformacijų pokyčiams. Kaip matyti 3.7 paveiksle, esant aukštesnei kaip 35 °C temperatūrai nustatytas tokios pat ribinės nuovargio apkrovos abiems dangos konstrukcijoms. Tai rodo, kad esant aukštai temperatūrai apkrovų poveikis bus taip pat žalingas visoms dangos konstrukcijoms nepriklausomai nuo jos eksploatacijos amžiaus.

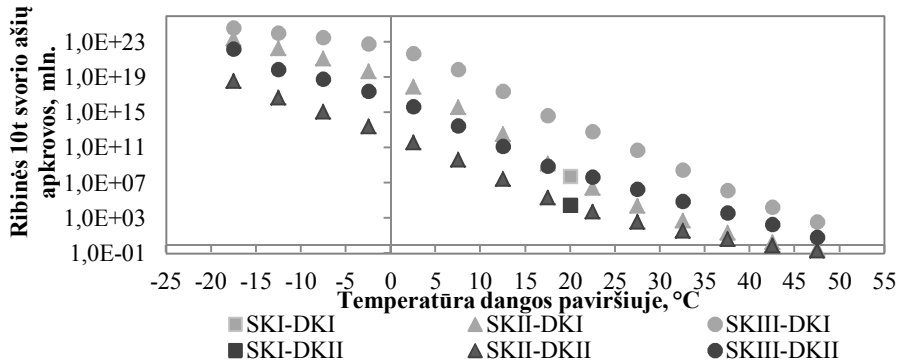
Įvertinus tampriai klampias asfalto sluoksnių savybes nustatytas didesnis ribinių nuovargio apkrovų skaičius lyginant su apkrovų skaičiumi nustatytu įvertinus tamprias sluoksnio savybes. Šis skirtumas sąlygotas ne vien asfalto mechaninių savybių, tačiau ir apkrovos laiko. Tamprios dangos konstrukcijos reakcija nustatyta nuo statinės apkrovos, tampriai klampios nuo judančios apkrovos.

Ribinės apkrovos skaldos pagrindo sluoksnio ir žemės sankasos liekamųjų deformacijų atžvilgiu pateiktos atitinkamai 3.8 ir 3.9 paveiksluose. Eksploatuojant dangos konstrukciją 10 t svorio ašinėms apkrovomis mažai tikėtinas struktūrinių deformacijų susidarymas, nes dangos konstrukcijos atlaiko daugiau kaip 32 mln. ašinių apkrovų (3.8 pav.). Tačiau esant aukštesnei nei 40 °C dangos paviršiaus temperatūrai, kai asfalto sluoksnių laikomoji geba ženkliai sumažėja, nustatyta struktūrinių provėžų rizika, nes ribinės 10 t svorio apkrovos siekė 0,35 ir 0,22 mln. aa. atitinkamai DK I ir DK II konstrukcijoms. Teigiama, kad viršijus ribines 10 t svorio ašių apkrovas danga suirs, t. y. susiformuos didesnės nei 12,5 mm struktūrinės deformacijos.

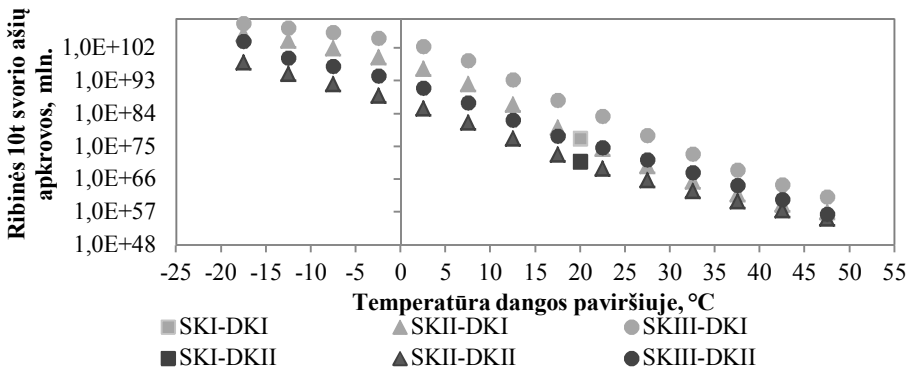
Žemės sankasos funkcionavimas liekamųjų deformacijų atžvilgiu pakankamas visais atvejais (3.9 pav.).



3.7 pav. Ribinės apkrovos asfalto nuovargio atžvilgiu
Fig. 3.7. The limit load according to asphalt fatigue



3.8 pav. Ribinės apkrovos SPS liekamųjų deformacijų atžvilgiu
Fig. 3.8. The limit load of crushed aggregate base permanent deformation



3.9 pav. Ribinės apkrovos žemės sankasos liekamųjų deformacijų atžvilgiu
Fig. 3.9. The limit load of subgrade permanent deformation

3.3. Asfalto dangos konstrukcijų projektavimo metodų ekonominis vertinimas

Dangos konstrukcijos projektavimas – sudėtinis procesas, kurio galutinį sprendinį nulemia daugelis kintamųjų pradedant nuo medžiagų tyrimų, taikomų metodų, inžinieriaus kvalifikacijos ir kt. Taikant įprastus, standartizuotus dangos konstrukcijos projektavimo metodus, nėra tiesiogiai atsižvelgiama į medžiagų mechanines savybes, taikomos apytikslės teorinės sluoksnių savybių vertės, prielaidos ir saugos koeficientai sąlygoja didesnę kelio tiesimo darbų ir medžiagų poreikį. Antrajame skyriuje nustatytos asfalto sluoksnių mechaninės savybės bei pritaikytas Hirsch modelis leidžia tiksliau įvertinti dangos konstrukcijos reakciją į apkrovą esant skirtingoms aplinkos sąlygoms bei optimizuoti dangos konstrukciją atsižvelgiant į jos funkcionavimą. Toks optimizavimas, jį pritaikius valstybinės reikšmės tinklo ar bent jo dalies mastu, neabejotinai būtų ekonomiškai efektyvesnis. Ekonominio vertinimo tikslas – įvertinti optimizuotų asfalto dangos konstrukcijų taikymo Lietuvos valstybinės reikšmės keliuose ekonominį efektą (ekonominę naudą).

Dangos konstrukcijos (DK) ekonominis vertinimas atliktas įvertinant: 1) sąnaudas medžiagų tyrimams ir projektavimo metodų pritaikymui; 2) sąnaudas suprojektuotų dangos konstrukcijų įrengimui. Ekonominiam vertinimui suprojektuotos III-čią klasę atitinkančios asfalto dangos konstrukcijos įvertinant:

1. Teorines medžiagų mechanines savybes (pagal KPT SDK).
2. Eksperimentu nustatytas medžiagų mechanines savybes iš asfalto sluoksnių bandymų (pagal KPT SDK įvertinant į medžiagų savybes).
3. Eksperimentu nustatytas medžiagų mechanines savybes prie aplinkos temperatūrų (dangos konstrukcijos reakcijos nustatymas prie 14-os temperatūrų intervalų):
 - 3.1 iš asfalto sluoksnių eksperimentinių bandymų (2.2 skyrelio);
 - 3.2 iš asfalto sluoksnių sudedamųjų dalių eksperimentinių bandymų bei savybių nustatymo pritaikant Hirsch (teorinį asfalto mišinių tamprumo modulio apskaičiavimo) modelį (2.3 skyrelio).
4. Tarpiai klampus asfalto sluoksnių savybes prie aplinkos temperatūrų iš asfalto mišinių sudedamųjų dalių eksperimentinių bandymų bei savybių nustatymo pritaikant Hirsch (teorinį asfalto mišinių tamprumo modulio apskaičiavimo) modelį (2.4 skyrelio).

Dangos konstrukcijų reakcija (įtempimai ir deformacijos) apskaičiuota nuo projektinės 10 t svorio ašinės apkrovos A. Taikant funkcionavimo formules (1.3, 1.4) nustatyti ribinės 10 t svorio ašių apkrovos atsižvelgiant į asfalto nuovargio ir nesurištų pagrindo sluoksnių bei žemės sankasos liekamųjų deformacijų sąlygas. Suprojektuotos dangos konstrukcijos ir ekonominio vertinimo kriterijai pateikti 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. Dangos konstrukcijų projektavimo ekonominio vertinimo kriterijai
Table 3.2. The criteria's of pavement design for economical evaluation

Aspek- tas	Kriterijus	Dangos konstrukcijos projektavimo ir analizės metodai				
		1.	2.	3.1	3.2	4.
Sąnaudos medžiagų tyrimams ir projektavimo metodų pritaikymui	Dangos konstrukcijos sluoksnių medžiagų tyrimai	Medžiagų savybės priimtose teorinės	AC standumas prie 20 °C AC Nuovargis	AC standumas prie 4-34 °C AC Nuovargis	AC mišinio fizikinės sav. Bit. DSR AC Nuovargis	AC mišinio fizikinės sav. Bit. DSR AC Nuovargis
	Projektavimo ir analizės laiko poreikis	3 h	5 h	24 h	14 h	40 h
	Specializuotos programinės įrangos poreikis	Nėra	MN Layer ar pan. Excel	MN Layer ar pan. Excel	MN Layer ar pan. Excel	ViscoRoute ar pan. Excel
	Kvalifikacijos lygis / DK projektavimo patirtis	Bakalauras	Magistras / Ne mažesnė kaip 2 metų	Magistras / Ne mažesnė kaip 3 metų	Daktaras / Ne mažesnė kaip 5 metų	Daktaras / Ne mažesnė kaip 5 metų
	Projektavimo tiesioginės ir pridėtinės išlaidos, Eur/h	70,08	122,64	140,16	262,79	262,79
Sąnaudos dangos konstrukcijos įrengimui	III DK Kl:					
	AC V	4 cm	3 cm	3 cm	3 cm	3 cm
	AC A	4 cm	4 cm	4 cm	4 cm	4 cm
	AC P	10 cm	8 cm	7 cm	7 cm	6 cm
	SPS	20 cm	20 cm	20 cm	20 cm	20 cm
	AŠAS	47 cm	47 cm	47 cm	47 cm	47 cm
	ŽS	-	Pag.	Pag.	Pag.	Pag.
	ŽS paruošimas	E _{V2} = 45 MPa		Pagerinta žvyro mišiniu (fr.0/16) E _{V2} = 120 MPa		
	AŠAS	Smėlis (fr. 0/11) E _{V2} =100 MPa		Smėlis (fr.0/11) E _{V2} = 120 MPa		
	SPS	Dolomito skalda (fr. 0/56) E _{V2} = 150 MPa				
	Asfalto pagrindo sluoksnio	AC 32 PN (50/70)	AC 32 PS (50/70)	AC 32 PS (50/70)	AC 32 PS (50/70)	AC 32 PS (50/70)
	Asfalto apatinio sluoksnio	AC 16 AN (50/70)	AC 16 AS (PMB 45/80-55)	AC 16 AS (PMB 45/80-55)	AC 16 AS (PMB 45/80-55)	AC 16 AS (PMB 45/80-55)
	Asfalto viršutinio sluoksnio	AC 11 VN (50/70)	SMA 11 S (PMB 45/80-55)	SMA 11 S (PMB 45/80-55)	SMA 11 S (PMB 45/80-55)	SMA 11 S (PMB 45/80-55)

3.2 lentelės pabaiga

Aspek- tas	Kriterijus	Dangos konstrukcijos projektavimo ir analizės metodai				
		1.	2.	3.1	3.2	4.
Sąnaudos dangos konstrukcijos įrengimui	Skaičiuojamoji konstrukcijos įrengimo kaina, eurai/m ²	97,54	92,68	89,76	89,76	86,83
	Ribinis 10t svorio ašių apkrovų skaičius, mln. aš.					
	pagal AC nuovargį	2,74 (1,09)	3,99 (0,75)	14,51 (0,77)	14,51 (0,77)	16,28 (0,48)
	pagal SPS liekamąsias deformacijas	1,86E+08 (0,0001)	8957 (<0,001)	1,61E+10 (3,29)	1,61E+10 (3,29)	1,99E+09 (1,91)
	pagal ŽS liekamąsias deformacijas	1,33E+38 (<0,001)	5,85E+66 (<0,001)	31,79E+79 (<0,001)	31,79E+79 (<0,001)	1,05E+75 (<0,001)

Ekonominis vertinimas atliktas palyginant skirtingais metodais suprojektuotų dangos konstrukcijų įrengimo sąnaudas. Nors ribinių apkrovų skaičiavimai rodo, kad optimizuotos dangų konstrukcijos yra patvaresnės už standartizuotas, priimta laikyti „blogiausio scenarijaus“ ir taikyti prielaidą, kad optimizuotos konstrukcijos turės vienodą ilgaamžiškumą ir tarpremontinius periodus kaip ir standartizuota dangos konstrukcijos (3.2 lentelės stulpelį 1). Vertinti skirtingais metodais suprojektuotų dangos konstrukcijų įrengimo kaštai magistraliniuose ir krašto keliuose.

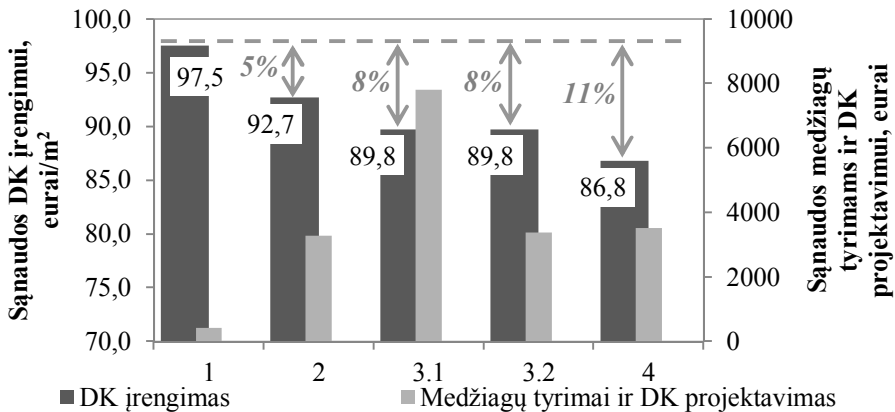
Asfalto dangos konstrukcijų vidutinės įrengimo kainos suskaičiuotos remiantis sustambintais statybos darbų ir medžiagų įkainiais. Šie įkainiai nustatyti išanalizavus VGTU Kelių instituto 2007 m. pasirašytas rangos sutartis (vykdant Automobilių kelių eksperimentinių dangų bandomojo ruožo ilgalaikių tyrimų programą). Konstrukcijų įrengimo darbų kiekiai ir kainos skaičiuotos 1-am km kelio su 7,5 m pločio danga. Vertinant ekonomiškai ir kad būtų galima kainas taikyti atliekant tolimesnę analizę, nustatyti vidutiniai dangos konstrukcijos įrengimo įkainiai 1-am m² kelio dangos. Kainos patikslintos įvertinant 2007–2016 m. statybos kainų indekso pokytį, kuris Lietuvos standartizacijos departamento duomenimis sudaro 13,5 % (LT SD 2016).

Siekiant toliau vertinti atlikta eismo intensyvumo ir transporto apkrovų tyrimų magistraliniuose ir krašto keliuose duomenų analizė (LAKD 2015). Pritaikius automobilių eismo augimo prognozę 20 metų perspektyvai, apskaičiuota projekcinė apkrova A (pagal KPT SDK 07). Prognozė sudaryta pagal ES leidinio „*EU energy, transport and GHG emissions trends to 2050. Reference scenario 2013*“ rekomendacijas (European Commission 2013). Taikytas vidutinis metinis sunkiojo transporto eismo intensyvumo didėjimo rodiklis – 1,39 %. Tokiu būdu nustatyta, kiek magistraliniuose ir krašto keliuose yra ruožų, kuriuose šiuo metu projekcinė apkrova A sudaro nuo 0,8 iki 3,0 mln. vienetų ekvivalentinių 10 t svorio ašies apkrovų. Tai yra ruožai, kuriuose, jei

šiuo metu juos reiktų rekonstruoti, turėtų būti taikoma III-čios klasės dangos konstrukcija. Nustatyta:

- magistraliniuose AM ir I kategorijos keliuose tokių ruožų yra 1,4 % (apie 13 km, skaičiuojant kiekvieną kelio važiuojamąją dalį atskirai);
- kituose magistraliniuose keliuose – 57,7 % (742,5 km);
- krašto keliuose – 30,5 % (1503 km).

Apskaičiuota metinė nauda jei 3.2 konstrukcijos būtų naudojamos ateityje tiesiant ir rekonstruojant kelius vietoje standartinės dangos konstrukcijos, pateikta 3.2 lentelėje. Darant prielaidą, kad visos optimizuotos konstrukcijos (Nr. 2, 3.1, 3.2, 4) užtikrina tą patį kelio ilgaamžiškumą bei tarpremontinių periodų trukmę kaip standartinės konstrukcijos. Dangos konstrukcijos įrengimo ir projektavimo su medžiagų tyrimais sąnaudų palyginimas pateiktas 3.10 paveiksle.



3.10 pav. Dangos konstrukcijos įrengimo ir projektavimo su medžiagų tyrimais sąnaudų palyginimas

Fig. 3.10. The comparison of pavement construction and pavement material test and design expenditure

Ekonominės naudos analizė parodė, kad optimizuota asfalto dangos III-ios klasės konstrukcija (3.2) yra vidutiniškai 8 % pigesnė už standartizuotą (vertinant jų įrengimo darbus ir medžiagų sąnaudas). Jei projektuojant visas III-ios klasės asfalto dangas automobilių keliuose būtų taikomi siūlomi dangos konstrukcijos projektavimo metodai ir būtų gaunamas ne mažesnis nei šis ekonominis efektyvumas, vien valstybinės reikšmės magistralinių ir krašto kelių, kuriuose reikalinga III-ios klasės dangos konstrukcija, rekonstrukcijos ir tiesimo darbams kasmet būtų galima sutaupyti apytiksliai 8,24 mln. eurų per metus (3.3 lentelę). Šią ekonominę naudą dar padidintų dangos konstrukcijos funkcionavimo įvertinimas, nes optimizuotos dangų konstrukcijos

Taip pat atlikta bendros ekonominės naudos visam magistralinių ir krašto kelių tinklui analizė. Taikant prielaidą, kad siūlomi projektavimo metodai leistų pasiekti ne mažesnę kaip 8 % ekonominį efektyvumą ir projektuojant kitų klasių dangų konstrukcijas, galima apytiksliai nustatyti visą siūlomų metodų taikymo ekonominį potencialą. Iš viso pritaikius siūlomus asfalto dangų projektavimo metodus, leidžiančius optimizuoti visas dangų konstrukcijas (3.4 lentelę) ir atpiginti jų įrengimą, per metus galėtų būti sutaupoma apie 25,3 mln. eurų (vertinant įprastas dangų įrengimo apimtis vien magistraliniuose ir krašto keliuose). Šie ekonominio vertinimo skaičiavimai pateikti priede E.

3.4. Trečiojo skyriaus išvados

Apibendrinant trečiajame skyriuje pateiktus modeliavimo ir analitinio tyrimo rezultatus galima teigti, kad:

1. Judanti apkrova, kai yra įvertinamos tampriai klampios asfalto sluoksnių savybės, sukelia 20 % (DK I) ir 19 % (DK II) mažesnes horizontaliąsias deformacijas asfalto pagrindo sluoksnio apačioje negu statinė apkrova. Taip pat matoma, kad eksploatuojamoje dangos konstrukcijoje (DK II) nustatytas mažesnis horizontaliųjų deformacijų skirtumas lyginant su nauja dangos konstrukcija (DK I). Tai rodo asfalto sluoksnių tampriai klampių savybių poveikio mažėjimą kelio eksploatacijos ilgame periode.
2. Analizuojant naujos ir 8-nis metus eksploatuojamos dangos konstrukcijos asfalto sluoksnių nuovargio sąlygas nustatyta, kad nuovargio procesai progresavo eksploatuojamoje dangos konstrukcijoje, nors vizualiai dangos paviršiuje pažeidimų nenustatyta. Nustatytas, 51 % (SK II) ir 55,5 % (SK III) mažesnis atsparumas nuovargiui (ribinis (leistinasis) apkrovų skaičius) eksploatuojamoje dangos konstrukcijoje lyginant su alternatyvia nauja dangos konstrukcija.
3. Skaičiavimai patvirtino, kad, esant aukštesnei kaip 35 °C temperatūrai, abiejų konstrukcijų ribinės nuovargio apkrovos skiriasi nežymiai. Esant tokioms sąlygoms apkrovų poveikis bus žalingas nepriklausomai nuo konstrukcijos eksploatacijos amžiaus. Taip pat nustatyta, kad esant aukštomis temperatūroms atsiranda liekamųjų deformacijų susidarymo rizika skaldos pagrindo sluoksnyje, nes ribinės 10 t svorio apkrovos siekia tik 0,35 mln. ir 0,22 mln. ašių apkrovų atitinkamai DK I ir DK II konstrukcijoms.
4. Dangos konstrukcijos projektavimas įvertinant medžiagų mechanines savybes leido optimizuoti dangos konstrukcijas atsižvelgiant į tris dangos konstrukcijos funkcionavimo kriterijus: asfalto sluoksnių atsparumo nuovargiui, nesurištų pagrindo sluoksnių atsparumo

liekamosioms deformacijoms ir žemės sankasos atsparumo liekamosioms deformacijoms. Ekonominė analizė parodė, kad optimizuota asfalto dangos III-čios klasės konstrukcija yra vidutiniškai 8 % pigesnė už standartizuotą.

5. Pritaikius tyrimo metu vertintus dangos konstrukcijos skaičiavimo metodus valstybinės reikšmės magistralinių ir krašto kelių, kuriuose reikalinga III-čios klasės dangos konstrukcija, rekonstrukcijos ir tiesimo darbams kasmet būtų galima sutaupyti apytiksliai 8,24 mln. eurų. Šią ekonominę naudą dar padidintų dangos konstrukcijos funkcionavimo įvertinimas. Pritaikius šiuos projektavimo metodus aukštesnės dangos konstrukcijos klasės projektavimui tikėtinas daugiau kaip 25,3 mln. eurų sutaupymas.

Bendrosios išvados

Apibendrinus disertacijos analitinius ir eksperimentinius tyrimų rezultatus formuluojamos šios išvados:

1. Literatūros analizė parodė, kad nėra visuotinai priimtų asfalto mišinių tampriai klampių savybių tyrimo, dangos konstrukcijos reakcijos į apkrovas ir funkcionavimo analitinių metodų, todėl praktikoje dažniausiai taikomi empiriniai metodai.
2. Disertacijoje taikyti analitiniais ir eksperimentiniais tyrimais pagrįsti dangos konstrukcijos modeliavimo metodai leidžia susieti medžiagų tamprias bei tampriai klampias savybes ir nustatyti konstrukcijos funkcionavimą prie eksploatacijos temperatūrų ir apkrovų sąlygų.
3. Nustatyti asfalto mišinių dinaminiai tamprumo moduliai bei sudarytos bitumo dinaminio šlyties modulio kompleksinės kreivės leido pritaikyti Hirsch modelį ir apskaičiuoti jo paklaidas. Taikant statistinės analizės metodus šios paklaidos sumažintos iki minimumo keičiant modelio empirinius koeficientus. Lyginant eksperimentu nustatytas ir patikslintu Hirsch modeliu apskaičiuotas dinaminio tamprumo modulio vertes nustatyta 2,3 % vidutinė skaičiavimo paklaida su 12,1 standartiniu nuokrypiu. Patikslintų Hirsch modelio koeficientų universalumo požymiai nebuvo tirti, todėl juos taikant kitiems asfalto mišiniams turi būti įvertintas paklaidos kitimas.

4. Taikant eksperimentu ištirtas asfalto tampriai klampias savybes modeliavimu nustatytas mažesnis asfalto sluoksnių atsparumas nuovargiui (ribinių (leistinųjų) apkrovų) eksploatuojamoje dangos konstrukcijoje lyginant su alternatyvia nauja dangos konstrukcija. Taip pat nustatytas tampriai klampių savybių poveikio nestandžios dangos konstrukcijos reakcijai į apkrovą mažėjimas didėjant dangos amžiui. Šie reiškiniai sietini su bitumo senėjimo ir asfalto nuovargio procesais, kurie nulemia didesnes horizontaliąsias deformacijas eksploatuojamoje dangos konstrukcijoje.
5. Tampriai klampių savybių įvertinimas modeliuojant asfalto dangos konstrukcijos reakciją į apkrovą leido optimizuoti III-ios klasės dangos konstrukciją įvertinant jos funkcionavimą ir ribines leistinąsias apkrovas. Optimizuota dangos konstrukcija yra to paties projekcinio laikotarpio, tačiau apie 8 % pigesnė už standartizuotą.
6. Automobilių kelių dangos konstrukcijos projektavimui taikant metodus įvertinančius asfalto sluoksnių tampriai klampias savybes ir funkcionavimą nustatytas 8,24 mln. eurų metinis ekonominis efektas III-ios dangos konstrukcijos klasės tiesybės darbams. Šiuos metodus taikant III-ios ir aukštesnės dangos konstrukcijos klasių tiesybai tikėtinas didesnis kaip 25,3 mln. eurų ekonominis efektas.

Rekomendacijos

1. Projektuojant automobilių kelių dangos konstrukcijas, kai projektinė apkrova viršija 3,0 mln., rekomenduojama taikyti disertacijoje pateiktą modeliavimo metodą, kuomet įvertinamas asfalto tampriai klampus būvis bei apkrovų dažnio bei temperatūros sąveikos poveikis.
2. Projektuojant automobilių kelių kapitalinį remontą rekomenduojama paimti asfalto sluoksnių bandinius bei nustatyti faktines mechanines savybes ir atsižvelgiant į jas prognozuoti liekamąjį dangos konstrukcijos amžių. Vertinant eksploatuojamos asfalto dangos konstrukcijos funkcionavimą, rekomenduojama taikyti patikslintą Hirsch modelį. Šis modelis užtikrina pakankamai tikslų asfalto mechaninių savybių apskaičiavimą pagal mišinio fizikines ir regeneruoto bitumo mechanines savybes.
3. Rekomenduojama tęsti tyrimus ir atlikti eksperimentinius įtempių bei deformacijų susidarymo eksploatuojamoje dangos konstrukcijoje matavimus siekiant nustatyti disertacijos eksperimentu apskaičiuotų parametrų tikslumą ir atitikimą faktiniams dangos konstrukcijos reakcijos parametrams.
4. Rekomenduojama tikslinti asfalto pagrindo sluoksnių atsparumo nuovargiui ir pagrindo sluoksnių bei žemės sankasos atsparumo liekamosioms deformacijoms funkcionavimo modelius atsižvelgiant į šalies klimato ir eksploatacines sąlygas bei nustatyti šių modelių atitikimą eksploatuojamų kelių dangos būklei prognozuoti.

Literatūra ir šaltiniai

AASHTO M320-10 2010. Standard Specification for Performance-Graded Asphalt binder.

AASHTO T315 2013. Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR), : 33.

AASHTO T322-07 2011. *Determining the Creep Compliance and Strength of Hot Mix Asphalt (HMA) Using the Indirect Tensile Test Device.*

AASHTO T342-11 2013. *Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.

ABAQUS 2014. ABAQUS User guide.

Adhikari S., You Z. 2010. 3D discrete element models of the hollow cylindrical asphalt concrete specimens subject to the internal pressure, *International Journal of Pavement Engineering* 11(5): 429–439. DOI: 10.1080/10298436.2010.489114.

Airey G., Rahimzadeh B., Collop A. 2003. Linear Viscoelastic Performance of Asphaltic Materials, *Road Materials and Pavement Design* 4(3): 269–292. DOI: 10.1080/14680629.2003.9689949.

Airey G.D., Rahimzadeh B. 2004. Combined bituminous binder and mixture linear rheological properties, *Construction and Building Materials* 18(2004): 535–548.

Al-Qadi I.L., Yoo P.J. 2007. Effect of Surface Tangential Contact Stresses on Flexible Pavement Response, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*: 663–692.

Amini A. a., Mashayekhi M., Ziari H., Nobakht S., Taylor P. 2012. Life cycle cost comparison of highways with perpetual and conventional pavements, *International Journal of Pavement Engineering* 13(6): 553–568. DOI: 10.1080/10298436.2011.628020.

Anderson D.A., Chris D.W., Bahia H.U., Antle C.E. 1994. *Binder Characterization and Evaluation Volume 3: Physical Characterization*.

Anderson A D., Christensen W D., Bahia U H., Dongre R., Sharma G M., Antle E C., Button J. 1994. *Binder characterization and evaluation. Volume 3: Physical characterization* Prieiga per internetą: <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp/SHRP-A-369.pdf>.

Andrei D., Witczak M.W., Mirza M.W. 1999. *Development of Revised Predictive Model for the Dynamic (Complex) Modulus of Asphalt Mixtures*.

Andriejauskas T., Vaitkus A., Tumavičė A. 2013. Traffic Monitoring and Weigh-in-Motion System for Lithuania Road Network *The XXVIII International Baltic Road Conference TRAFFIC*.

Attia M., Abdelrahman M. 2011. Road Materials and Pavement Design Effect of State of Stress on the Resilient Modulus of Base Layer Containing Reclaimed Asphalt Pavement Effect of State of Stress on the Resilient Modulus of Base Layer Containing Reclaimed Asphalt Pavement, (June 2015): 37–41. DOI: 10.1080/14680629.2011.9690353 .

Bahia H.U., Hanson D., Zeng M., Zhai H., Khatri A. 2001. *Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design. NCHRP Report 459*, Washington, D.C.

Bari J., Witczak M.W. 2007. New Predictive Models for the Viscosity and Complex Shear Modulus of Asphalt Binders for Use with the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, 250(July 2006).

Di Benedetto H., Asayer Soltani A., Chaverot P. 1996. The Fatigue of the Bituminous Mixes: A Pertinent Approach of its Measurement and its Characterization *Eurashpalt & Eurobitume Congress, Strasbourg, 7-10 MAY 1996. Vol 2*.

Di Benedetto H., Olard F., Sauzéat C., Delaporte B. 2004. Linear viscoelastic behaviour of bituminous materials: From binders to mixes, *Road Materials and Pavement Design* 5(sup1): 163–202. DOI: 10.1080/14680629.2004.9689992 [Žiūrėta sausio 31, 2014].

Di Benedetto H., Partl M.N., Francken L., De La Roche C. 2001. Stiffness testing for bituminous mixtures. RILEM TC 182-PEB Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials, *Materials and Structures* 34: 66–70.

Van der Bergh W. 2011. *The Effect of Ageing on the Fatigue and Healing Properties of Bituminous Mortars*. Technische Univeriteit Delft.

Bilodeau J., Doré G. 2012. Water sensitivity of resilient modulus of compacted unbound granular materials used as pavement base, *International Journal of Pavement Engineering* 13(5): 459–471. DOI: 10.1080/10298436.2011.573556

Biot M.A. 1954. Theory of stress-strain relations in anisotropic viscoelasticity and relaxation phenomena, *Journal of Applied Physics* 25(11): 1385–1391. DOI: 10.1063/1.1721573 .

Blab R., Kappl K., Lackner R., Aigner L. 2006. *SAMARIS. Permanent Deformation of*

Bituminous Bound Materials in Flexible Pavements. Evaluation of Test Methods and Prediction Models.

Bonaquist R., Pellinen T.K., Witczak M.W. 1998. *Development of Relationship Between Binder Viscosity and Stiffness*, Superpave Support and Performance Models Management. Department of Civil Engineering, University of Maryland, College Park, Maryland.

Boussinesq J. 1885. *Application des Potentiels a l'etude de l'equilibre et du Mouvement de s Solids Elastiques*, Gauthier-Villars, Paris.

Braga A. 2005. *Dangų degradacijos modeliai ir jų taikymas Lietuvos automobilių keliams (Models of Pavement Deterioration and their Adaptation to Lithuanian Automobile Roads)*. Vilnius Gediminas technical university.

Braham A.F., Buttlar W.G., Clyne T.R., Marasteanu M.O., Turos M.I. 2009. The Effect of Long-Term Laboratory Aging on Asphalt Concrete Fracture Energy, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* 78: 417–454.

Brown A.B., Sparks J.W., Smith F.M. 1957. Steric Hardening of Asphalts *Proceeding of Assosiation of Asphalt Paving Technologist*.

BRRC 2000. *Advanced Models for Analytical Design of European Pavement Structures AMADEUS RO-97-SC.2137*.

Burmister D.M. 1945. The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Soil Systems, *Journal of Applied Physics* 16: 84–94, 296–302.

Burmister D.M. 1943. The Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems and Applications to the Design of Airport Runways *The Highway Research Board*.

Buttlar W.G., Roque R. 1994. Development and Evaluation of the Strategic Highway Research Program Measurement and Analysis System for Indirect Tensile Testing at Low Temperature, *Transportation Research Record No. 1454: Asphalt Concrete Mixture Design and Performance*: 163–171.

Button J.W., et al. 2001. *Circular 503: Perpetual Bituminous Pavements*.

Carvalho R.L.E. de 2012. *Prediction of Permament Deformation in Asphalt Concrete*.

Cerni G., Colagrande S. 2012. SIIV - 5th International Congress - Sustainability of Road Infrastructures Resilient modulus of recycled aggregates obtained by means of dynamic tests in a triaxial apparatus, *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 53: 475–484. DOI: 10.1016/j.sbspro.2012.09.898.

Cerni G., Corradini a., Pasquini E., Cardone F. 2015. Resilient behaviour of unbound granular materials through repeated load triaxial test: influence of the conditioning stress, *Road Materials and Pavement Design* 16(1): 70–88. DOI: 10.1080/14680629.2014.964294.

Chabot A., Chupin O., Deloffre L., Duhamel D. 2010. ViscoRoute 2.0 A Tool for the Simulation of Moving Load Effects on Asphalt Pavement, *Road Materials and Pavement Design* 11(2): 227–250. DOI: 10.3166/rmpd.11.227-250.

Chabot A., Chupin O., Deloffre L., Duhamel D. 2010. ViscoRoute 2.0 A tool for the simulation of moving load effects on asphalt pavement, *Road Materials and Pavement*

Design 11–2(April 2013): 227–250. DOI: 10.3166/RMPD.11.227-250.

Chehab G.R., Kim R.Y., Schapery R. a., Witczak M.W., Bonaquist R.F. 2002. Time-Temperature Superposition Principle for Asphalt Concrete with Growing Damage in Tension State, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* 71: 559–593.

Cho Y.H., Park D.W., Hwang S. Do 2010. A predictive equation for dynamic modulus of asphalt mixtures used in Korea, *Construction and Building Materials* 24(4): 513–519. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.10.008.

Choi Y.-T., Kim Y.R. 2014. Implementation and verification of a mechanistic permanent deformation model (shift model) to predict rut depths of asphalt pavement, *Road Materials and Pavement Design* 15(sup1): 195–218. DOI: 10.1080/14680629.2014.927085

Christensen D.W., Anderson D.A. 1996. Interpretation of Dynamic Mechanical Test Data for Paving Grade Asphalt Cements, *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists* 61: 67–116.

Christensen D.W., Bonaquist R. 2012. Modeling of fatigue damage functions for hot mix asphalt and application to surface cracking, *Road Materials and Pavement Design* 13(sup1): 102–123. DOI: 10.1080/14680629.2012.657029.

Christensen D.W., Bonaquist R.F. 2006. *NCHRP Report 567 - Volumetric Requirements for Superpave Mix Design*, Washington, D.C, USA.

Christensen D.W., Pellinen T., Bonaquist R.F. 2003. Hirsch Model for Estimating the Modulus of Asphalt Concrete, *The Association of Asphalt Paving Technologists* 72: 97–121.

Christensen R.M. 1982. *Theory of Viscoelasticity* 2nd leid., New York: Academic.

Chupin O., Piau J.-M., Chabot a. 2012. Evaluation of the structure-induced rolling resistance (SRR) for pavements including viscoelastic material layers, *Materials and Structures* 46(4): 683–696. DOI: 10.1617/s11527-012-9925-z.

Corté J.-F., Goux M.-T. 1996. Design of Pavement Structures: The French Technical Guide, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1539(1): 116–124. DOI: 10.3141/1539-16.

C-SHRP 1995. Superpave Binder Specifications and Test Methods.

Culley R.W. 1969. Relationship between Hardening of Asphalt Cements and Transverse Cracking of Pavements in Saskatchewan, *Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists* 38.

Cundall P.A., Strack O.D.L. 1979. A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique* 29(1): 47–65.

Čygas D., Laurinavičius A., Paliukaitė M., Motiejūnas A., Žiliūtė L., Vaitkus A. 2015. Monitoring the mechanical and structural behavior of the pavement structure using electronic sensors, *Computer aided civil and infrastructure engineering* 30(4): 317–328.

Čygas D., Laurinavičius A., Vaitkus A., Perveneckas Z., Motiejūnas A. 2008. Research of Asphalt Pavement Structures on Lithuanian Roads (I), *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 3(2): 77–83. DOI: 10.3846/1822-427X.2008.3.77-83.

Darling D.A. 1957. The Kolmogorov-Smirnov, Cramer-von Mises Tests, *The Annals of Mathematical Statistics* 28(4): 823–838.

Dave E. V. 2009. *Asphalt Pavement Aging and Temperature Dependent Properties Using Functionally Graded Viscoelastic Model*. University of Illinois at Urbana-Champaign.

Desroches L., Turos M., Marasteanu M., Zofka A. 2015. Experimental Determination of Poisson's Ratio for Asphalt Binders at Low Temperature *TRB 94th Annual Meeting Compendium of Papers*.

Desroches L., Turos M., Marasteanu M., Zofka A. 2015. Experimental determination of Poisson's ratio for asphalt binders at low temperature *94th Transportation Research Board Annual Meeting*.

Dickinson E.J. 1974. The Dynamic Shear Modulus of Paving Asphalts as a Function of Frequency, *Journal of Rheology* 18(4): 591. DOI: 10.1122/1.549349.

Dijk W. Van, Visser W. 1977. The Energy Approach to Fatigue for Pavement Design, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* 46: 1–37.

Dobson G.R. 1969. The Dynamic Mechanical Properties of Bitumen, *Proceeding of Association of Asphalt Paving Technologist* 48: 123–135.

Dore G., Zubeck H.K. 2009. *Cold Regions Pavement Engineering* 1st ed. L. S. Hager, sud.American Society of Civil Engineers.

Duhamel D., Chabot A., Tamagny P., Harfouche L. 2005. Viscoroute: Visco-elastic modeling for asphalt pavements, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et chaussées* No. 258-25: 89–103.

Duhamel D., Chabot A., Tamagny P., Harfouche L. 2005. Viscoroute: Visco-elastic modeling for asphalt pavements - Viscoroute : Modélisation des chaussées bitumineuses, *Cahier Thématique : Méthodes Numériques En Génie Civil. Bulletin Des Laboratoires Des Ponts Et Chaussées*: 89–103.

Eddahak-Ouni A., Dony A., Colin J. 2012. Prediction of the rutting potential of bituminous binders using a stochastic approach, *Road Materials and Pavement Design* 13(1): 38–48. DOI: 10.1080/14680629.2011.644061.

Ekblad J., Isacsson U. 2008. Influence of water and mica content on resilient properties of coarse granular materials, *International Journal of Pavement Engineering* 9(3): 215–227. DOI: 10.1080/10298430701551193.

Ekblad J., Isacsson U. 2006. Influence of Water on Resilient Properties of Coarse Granular Materials, *Road Materials and Pavement Design* 7(3): 369–404. DOI: 10.1080/14680629.2006.9690043.

Elseif M.A. 2003. *Performance Quantification of Interlayer Systems in Flexible Pavements Using Finite Element Analysis, Instrument Response, and Non Destructive Testing*. Virginia Polytechnic Institute and State University.

Erlingsson S. 2012. Rutting development in a flexible pavement structure, *Road Materials and Pavement Design* 13(2): 218–234. DOI: 10.1080/14680629.2012.682383

Erlingsson S., Ahmed A.W. 2013. Fast layered elastic response program for the analysis

of flexible pavement structures, *Road Materials and Pavement Design* 14(1): 196–210. DOI: 10.1080/14680629.2012.757558.

European Commission 2013. *EU Energy, Transport and GHG Emissions: Trends to 2050 - Reference Scenario 2013*. DOI: 10.2833/17897.

Ewalds H.L., Wanhill R.J.H. 1986. *Fracture Mechanics* Edward Arnold.

Fang H., Haddock J.E., White T.D., Hand A.J. 2004. On the characterization of flexible pavement rutting using creep model-based finite element analysis, *Finite Elements in Analysis and Design* 41(1): 49–73. DOI: 10.1016/j.finel.2004.03.002.

Farrar M., Turner T., Planche J., Schabron J., Harnsberger P. 2013. Evolution of the Crossover Modulus with Oxidative Aging, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2370(2370): 76–83. DOI: 10.3141/2370-10.

Fasano G., Franceschini A. 1987. A multidimensional version of the Kolmogorov-Smirnov test, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 225(1): 155–170.

FGSV 430 2009. *Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens von Asphalten mit dem Spaltzug-Schwellversuch als Eingangsgröße in die Dimensionierung AL Sp-Asphalt 09*, Köln.

FGSV 498 2009. *Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht RDO Asphalt 09 (Guidelines for mathematical dimensioning of foundations of traffic surfaces with a course asphalt surface)*, Köln, Germany, Germany.

Fonseca O.A., Witczak M.W. 1996. A Prediction Methodology for the Dynamic Modulus of In-Placed Aged Asphalt Mixtures, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* 65.

Forough S.A., Moghadas Nejad F., Khodaii A. 2015. Development of a predictive model for the compressive relaxation modulus of asphalt mixtures, *Road Materials and Pavement Design* 16(3): 674–695. DOI: 10.1080/14680629.2015.1028967.

Forough S.A., Moghadas Nejad F., Khodaii A. 2015. Predicting the tensile relaxation modulus of asphalt mixes based on the mix design and environmental factors, *International Journal of Pavement Engineering*: 1–12.

Forough S.A., Nejad F.M., Khodaii A. 2014. A comparative study of temperature shifting techniques for construction of relaxation modulus master curve of asphalt mixes, *Construction and Building Materials* 53: 74–82. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.060.

Francken L. 1998. *Bituminous Binders and Mixes. State of Art and Interlaboratory Tests on Mechanical Behaviour and Mix Design. Report of RILEM Technical Committee 152-PBM* L. Francken, sud.RILEM.

Francken L., Clauwaert C. 1988. Characterization and structural assessment of bound materials for flexible road structures *The 6th international conference on the structural design of asphalt pavements*. Ann Arbor: University of Michigan.

Francken L., Verstraeten J. 1974. Methods for Predicting Moduli and Fatigue Laws of Bituminous Road Mixes Under Repeated Bending, *Transportation Research Record* 515: 114–123.

- Frangopol D.M., Liu M. 2007. Maintenance and management of civil infrastructure based on condition, safety, optimization, and life-cycle cost*, *Structure and Infrastructure Engineering* 3(1): 29–41. DOI: 10.1080/15732470500253164.
- Gajewski M., Sybilski D., Bańkowski W. 2015. The influence of binder rheological properties on asphalt mixture permanent deformation, *Baltic Journal of Road & Bridge Engineering* 10(1): 54–60. DOI: 10.3846/bjrbe.2015.07.
- Gallaway B.M. 1957. Durability of Asphalt Cements Used in Surface Treatments, *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists* 26: 151.
- Ghabchi R., Zaman M., Khoury N., Kazmee H., Solanki P. 2013. Effect of gradation and source properties on stability and drainability of aggregate bases: a laboratory and field study, *International Journal of Pavement Engineering* 14(3): 274–290. DOI: 10.1080/10298436.2012.711475.
- Gillespie T.D., Karamihas S.M., Cebon D., Sayers M.W., Nasim M.A., Hansen W., Ehsan N. 1992. *Effects of heavy vehicle characteristics on pavement response and performance*.
- Goodrich J.L. 1988. Asphalt and Polymer Modified Asphalt Properties Related to the Performance of Asphalt Concrete Mixes, *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists* 57: 116–160.
- Gordon G.V., Shaw M.T. 1994. *Computer Programs for Rheologists* Hanser/Gadner Publ.
- Graczyk M., Rafa J., Zofka A. 2016. The Selected Problems of Multi-layer Pavements – Influence of Composite Impacts Vehicles and Climatic Factors on the Behavior of Roads Pavements, *Transportation Research Procedia* 14: 2487–2496. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.316.
- Graczyk M., Zofka A., Urbanik A., Rafa J. 2014. Analytical Solution for Heat Propagation with Infinite Speed in the Multilayer Pavement System *26th ARRB Conference – Research driving efficiency*.
- Hertz H.R. 1881. Ueber die Berührung fester elastischer Körper, *Journal Für Die Reine Und Angewandte Mathematik (Crelle's Journal)* 92(1).
- Hess R. 1998. *Kalibrierung von Verhaltensmodellen für das Straßenerhaltungsmanagement [Calibration of behavior models for the road maintenance management]*. University of Hannover.
- Heukelom W. 1966. Observation on the rheology and fracture of bitumens and asphalt mixes, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* 35: 3–48.
- Hilton H.H. 2001. Implications and constraints of time-independent Poisson ratios in linear isotropic and anisotropic viscoelasticity, *Journal of Elasticity* 63: 221–251.
- Hirsch T.J. 1969. *The Effect of Elastic moduli on the Cement Paste Matrix and Aggregate on Modulus of Elasticity of Concrete*. Agricultural and Mechanical College of Texas, College Station Texas.
- Ho X.N., Nowamooz H., Chazallon C., Migault B. 2014. Influence of fine content and water content on the resilient behaviour of a natural compacted sand, *Road Materials and Pavement Design* 15(3): 606–621. DOI: 10.1080/14680629.2014.908136.

Hogentogler C.A., Terzaghi C. 1929. Interrelationship of load, road and subgrade, *Public Roads* 10(3): 37–64.

Holzer S.M. 1985. *Computer Analysis of Structures: Matrix Structural Analysis Structured Programming* Elsevier Science Ltd.

Hondros G. 1959. The evaluation of poisson's ratio and the modulus of materials of a low tensile resistance by the brazilian (indirect tensile) test with particular reference to concrete, *Australian Journal of Applied Science* 10: 243–251.

Hopman P.C., Kunst P.A.J.C., Pronk A.C. 1989. A renewed interpretation method for fatigue measurements: verification of Miner's rule *Proceedings Eurobitume Conference, Vol.1, Madrid*.

Huang C., Abu Al-Rub R.K., Masad E. a., Little D.N., Airey G.D. 2011. Numerical implementation and validation of a nonlinear viscoelastic and viscoplastic model for asphalt mixes, *International Journal of Pavement Engineering* 12(4): 433–447. DOI: 10.1080/10298436.2011.574137.

Huang Y.H. 2004. *Pavement Analysis and Design* 2nd ed., New Jersey: Pearson Prentice Hall, ISBN 0-13-142473-4.

Huang Y.H. 1968. Stresses and Displacements in Nonlinear Soil Media, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division ASCE* 94(SM1): 1–19.

Huang Y.H. 1967. Stresses and Displacements in Viscoelastic Layered Systems Under Circular Loaded Areas" *2nd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*.

Huet C. 1999. Coupled size and boundary-condition effects in viscoelastic heterogeneous and composite bodies, *Mechanics of Materials* 31(12): 787–829. DOI: 10.1016/S0167-6636(99)00038-1.

Huet C. 1963. *Etude par une méthode d'impédance du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés*. Université de Paris.

Yoder E.J., Witczak M.W. 1975. *Principles of pavement design* 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc.

Yoo P.J., Al-Qadi I.L., Elseifi M. a., Janajreh I. 2006. Flexible pavement responses to different loading amplitudes considering layer interface condition and lateral shear forces, *International Journal of Pavement Engineering* 7(1): 73–86. DOI: 10.1080/10298430500516074.

Young I.T. 1977. Proof without prejudice: use of the Kolmogorov-Smirnov test for the analysis of histograms from flow systems and other sources., *Journal of Histochemistry & Cytochemistry* 25(7): 935–941. DOI: 10.1177/25.7.894009.

Yusoff N.I.M., Jakarni F.M., Nguyen V.H., Hainin M.R., Airey G.D. 2013. Modelling the rheological properties of bituminous binders using mathematical equations, *Construction and Building Materials* 40(2013): 174–188. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.09.105.

Jongepier R., Kuilman B. 1969. Characteristics of the Rheology of Bitumens, *Proceeding of Association of Asphalt Paving Technologist* 38: 98–119.

Jongepier R., Kuilman B. 1970. The dynamic shear modulus of bitumens as a function of frequency and temperature, *Rheologica Acta* 9(1): 102–111. DOI: 10.1007/BF01984600.

Kaelble D.H. 1985. *Computer-Aided Design of Polymers and Composites* CRC Press.

Kandhal P.S., Sandvig L.D., Wenger M.E. 1973. Shear Susceptibility of Asphalts in Relation to Pavement Performance, *Proceeding of Association of Asphalt Paving Technologist* 42: 99–111.

Katicha S.W. 2007. *Analysis of Hot-Mix Asphalt (HMA) Linear Viscoelastic and Bimodular Properties Using Uniaxial Compression and Indirect Tension (IDT) Tests*.

Kennedy T.W., Cominsky R.J., Harrigan E.T., Leahy R.B. 1990. *Hypotheses and Models Employed in the SHRP Asphalt Research Program*, Washington, D.C, USA.

Khazanovich L., Wang Q.C. 2008. MnLayer: High-Performance Layered Elastic Analysis Program, *Transportation Research Record* 2037(1): 63–75. DOI: 10.3141/2037-06.

Khosravifar S., Farzaneh A., Haider I., Schwartz C.W. 2015. Advantages of Non-Symmetric Sigmoidal Function in Construction of Dynamic Modulus Master Curves of Asphalt Mixtures *Transportation Research Board 94th Annual Meeting*.

Kim Y.R. 2009. *Modeling of Asphalt Concrete* American Society of Civil Engineers. DOI: 10.1036/007146462X.

Kim Y.R., Hibbs B.O., Lee Y.C., Inge E.H. 1994. *Asphalt Paving Material Properties Affected by Temperature*, Technical Report Submitted to North Carolina Department of Transportation under Contract No. 23241-93-6, March 1994.

Korkiala-Tanttu L. 2008. Calculation method for permanent deformation of unbound pavement materials *Dissertation of Science in Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Helsinki University of Technology. Finland*: 92.

LAKD 2015. Lietuvos automobilių kelių direkcija prie Susisiekimo ministerijos, <http://www.lakd.lt>.

Lekarp F., Dawson A. 1998. Modelling permanent deformation behaviour of unbound granular materials, *Construction and Building Materials* 12(1): 9–18. DOI: 10.1016/S0950-0618(97)00078-0.

Lesueur D. 2009. The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification, *Advances in Colloid and Interface Science* 145(1–2): 42–82. DOI: 10.1016/j.cis.2008.08.011.

Li X., Zofka A., Marasteanu M., Clyne T.R. 2006. Evaluation of field aging effects on asphalt binder properties, *Road Materials and Pavement Design* 7(sup1): 57–73. DOI: 10.1080/14680629.2006.9690058.

Lytton R.L., Uzan J., Fernando E.G., Roque R., Hiltunen D., Stoffels S.M. 1993. *Development and Validation of Performance Prediction Models and Specifications for Asphalt Binders and Paving Mixes. SHRP-A-357*, Washington, D.C, USA.

LST EN 12591 2009. *Bitumas ir bituminiai rišikliai. Kelių bitumo techniniai reikalavimai [Bitumen and bituminous binders - Specifications for paving grade*

bitumens], Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius.

LST EN 12607-1 2015. *Bitumas ir bituminiai rišikliai. Atsparumo kietėjimui, veikiant šilumai ir orui, nustatymas. 1 dalis. RTFOT metodas [Bitumen and bituminous binders - Determination of the resistance to hardening under influence of heat and air - Part 1: RTFOT method]*, Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius.

LST EN 12697-1 2012. *Bituminiai mišiniai. Karštojo asfalto mišinio bandymo metodai. 1 dalis. Tirpiojo rišiklio kiekis [Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 1: Soluble binder content]*, Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius.

LST EN 12697-2+A1 2007. *Bituminiai mišiniai. Bandymo metodai. 2 dalis. Granulometrinės sudėties nustatymas [Bituminous mixtures - Tests methods - Part 2: Determination of particle size distribution]*, Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius.

LST EN 12697-24 2012. *Bituminiai mišiniai. Karštojo asfalto mišinio bandymo metodai. 24 dalis. Atsparumas nuovargiui [Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 24: Resistance to fatigue]*, Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius.

LST EN 12697-26 2012. *Bituminiai mišiniai. Karštojo asfalto mišinio bandymo metodai. 26 dalis. Standis [Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 26: Stiffness]*, Brussels.

LST EN 12697-3 2013. *Bituminiai mišiniai. Karštojo asfalto mišinio bandymo metodai. 3 dalis. Bitumo regeneravimas sukiuoju garintuvu [Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 3: Bitumen recovery: Rotary evaporator]*, Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius.

LST EN 12697-5 2012. *Bituminiai mišiniai. Karštojo asfalto mišinio bandymo metodai. 5 dalis. Didžiausio tankio nustatymas [Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 5: Determination of the maximum density]*, Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius.

LST EN 12697-6 2012. *Bituminiai mišiniai. Karštojo asfalto mišinio bandymo metodai. 6 dalis. Bituminių bandinių tariamojo tankio nustatymas [Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens]*, Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius.

LST EN 12697-8 2003. *Bituminiai mišiniai. Karštojo asfalto mišinio bandymo metodai. 8 dalis. Bituminių bandinių tuštymėtumo rodiklių nustatymas [Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens]*, Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius.

LST EN 14023 2011. *Bitumas ir bituminiai rišikliai. Polimerais modifikuotų bitumų techninių reikalavimų sistema [Bitumen and bituminous binders - Specification framework for polymer modified bitumens]*, Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius.

LST EN 1426 2007. *Bitumas ir bituminiai rišikliai. Adatos penetracijos nustatymas [Bitumen and bituminous binders - Determination of needle penetration]*, Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius.

LST EN 1427 2007. *Bitumas ir bituminiai rišikliai. Minkštėjimo temperatūros nustatymas. Žiedo ir rutulio metodas [Bitumen and bituminous binders - Determination of softening point - Ring and Ball method]*, Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius.

LST EN 14770 2012. *Bitumas ir bituminiai rišikliai. Kompleksinio šlyties modulio ir fazės kampo nustatymas. Dinaminis šlyties reometras (DSR) [Bitumen and bituminous binders - Determination of complex shear modulus and phase angle - Dynamic Shear Rheometer (DSR)]*.

LT SD 2016. Lietuvos standartizacijos departamentas. Prieiga per internetą: <http://osp.stat.gov.lt/statistiniu-rodikliu-analize?id=2041&status=A>.

Lundstrom R., Ekblad J., Isacson U., Karlsson R. 2007. Fatigue Modeling as Related to Flexible Pavement Design, *Road Materials and Pavement Design* 8(2): 165–205. DOI: 10.1080/14680629.2007.9690072.

Maccarone S. 1987. Rheological Properties of Weathered Asphalts Extracted from Sprayed Seals Nearing Distress Conditions, *Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists* 56: 654–687.

Mangiafico S., Sauzéat C., Di H., Pouget S., Olard F., Planque L. 2016. Prediction of LVE behavior of mixtures containing RAP from properties of base constituents *Proceedings of 6th Transport Research Arena, April 18-21, 2016, Warsaw, Poland*.

Marasteanu M., Anderson D. 2000. Establishing Linear Viscoelastic Conditions for Asphalt Binders, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1728(0): 1–6. DOI: 10.3141/1728-01.

Markauskas D., Kačianauskas R. 2006. Compacting of particles for biaxial compression test by the discrete element method, *Journal of Civil Engineering and Management* 8(2): 153–161. DOI: 10.1080/13923730.2006.9636387.

Masad E., et al. 2014. Finite element modelling of field compaction of hot mix asphalt. Part II: Applications, *International Journal of Pavement Engineering* (May 2015): 1–15. DOI: 10.1080/10298436.2013.863310.

McLeod N.W. 1968. Transverse pavement cracking related to hardness of the asphalt cement *13th Conference Canadian Technical Asphalt Association*.

Moavenzadeh J., Stander R.R. 1967. Effect of Aging on Flow Properties of Asphalts, *Highway Research Board Record* 178.

Mollenhauer K., Wistuba M. 2012. Evaluation of hot-mix asphalt susceptibility to temperature-induced top-down fatigue cracking by means of Uniaxial Cyclic Tensile Stress Test, *Road Materials and Pavement Design* 13(1): 171–190. DOI: 10.1080/14680629.2012.664524.

Mun S., Chehab G.R., Kim Y.R. 2007. Determination of Time-domain Viscoelastic Functions using Optimized Interconversion Techniques, *Road Materials and Pavement Design* 8(December 2014): 351–365. DOI: 10.1080/14680629.2007.9690078.

Nagrochienė D., Žurauskienė R. 2009. *Statybinės medžiagos ir jų gaminiai* 3rd leid., Vilnius, Lithuania: VGTU leidykla TECHNIKA.

NCHRP 1-37A 2004a. *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and*

Rehabilitated Pavement Structures, Champaign, Illinois, USA.

NCHRP 1-37A 2004b. *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. PART 2. DESIGN INPUTS. CHAPTER 4. TRAFFIC*, Champaign, Illinois, USA.

Nellenstyen F.J. 1924. The constitution of asphalt, *Journal of the Institute of Petroleum* 10: 311–325.

Nicholls J.C. 1998. *Asphalt Surfacing. A Guide to Asphalt Surfacing and Treatments Used for the Surface Course of Road Pavements* CRC Press.

Nilsson B.R., Chehab G.R., Kim Y.R. 2004. Application of a viscoelastoplastic continuum damage tensile model to asphalt mixes in Sweden, *Road Materials and Pavement Design* 5(sup1): 133–161. DOI: 10.1080/14680629.2004.9689991.

Nowamooz H., Chazallon C., Arsenie M.I., Hornyh P., Masrouri F. 2011. Unsaturated resilient behavior of a natural compacted sand, *Computers and Geotechnics* 38(4): 491–503. DOI: 10.1016/j.compgeo.2011.02.013.

Nowamooz H., Ho X.N., Chazallon C., Hornyh P. 2013. The effective stress concept in the cyclic mechanical behavior of a natural compacted sand, *Engineering Geology* 152(1): 67–76. DOI: 10.1016/j.enggeo.2012.09.014.

Nur N.I., Chailleux E., Airey G.D. 2011. A comparative study of the influence of shift factor equations on master curve construction, *International Journal of Pavement Research and Technology* 4(6): 324–336.

Odemark N. 1949. Investigations as to the Elastic Properties of Soils and Design of Pavements According to the Theory of Elasticity, *Stockholm: Staten Vagininstitut. Mitteilug* 77.

Olard F., Di Benedetto H. 2003. General “2S2P1D” Model and Relation Between the Linear Viscoelastic Behaviours of Bituminous Binders and Mixes, *Road Materials and Pavement Design* 4(2): 185–224. DOI: 10.1080/14680629.2003.9689946.

Olard F., Di Benedetto H., Eckmann B., Triquigneaux J.-P. 2003. Linear Viscoelastic Properties of Bituminous Binders and Mixtures at Low and Intermediate Temperatures, *Road Materials and Pavement Design* 4(1): 77–107. DOI: 10.1080/14680629.2003.9689941.

Ozer H., Al-Qadi I.L., Wang H., Leng Z. 2012. Characterisation of interface bonding between hot-mix asphalt overlay and concrete pavements: modelling and in-situ response to accelerated loading, *International Journal of Pavement Engineering* 13(2): 181–196. DOI: 10.1080/10298436.2011.596935.

Paliukaite M. 2014. Bitumo savybių kitimo įtaka asfalto dangos funkcionavimui *Dissertation of Civil Engineering, Department of Roads of Vilnius Gediminas technical university. Vilnius: 166.*

Paliukaitė M., Vaitkus A., Zofka A. 2015. Influence of bitumen chemical composition and ageing on pavement performance, *the Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 10(1): 97–104. DOI: 10.3846/bjrbe.2015.12.

Palšaitis E., Vidugris L. 1999. *Automobilių kelių projektavimas. Teorija ir praktika*, Vilnius.

Park S.W., Schapery R.A. 1999. Methods of interconversion between linear viscoelastic material functions. Part I—a numerical method based on Prony series, *International Journal of Solids and Structures* 36(11): 1653–1675. DOI: 10.1016/S0020-7683(98)00055-9.

Pellinen T., Zofka A., Marasteanu M., Funk N. 2007. The use of asphalt mixture stiffness predictive models, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologist* 76: 575–626.

Pellinen T.K., Witczak M.W., Bonaquist R.F. 2003. Asphalt Mix Master Curve Construction Using Sigmoidal Fitting Function with Non-Linear Least Squares Optimization *Recent Advances in Materials Characterization and Modeling of Pavement Systems*, Reston, VA: American Society of Civil Engineers. DOI: 10.1061/40709(257)6.

Pellinen T.K., Witczak M.W., Marasteanu M., Chehab G., Alavi S., Dongré R. 2002. Stress dependent master curve construction for dynamic (complex) modulus, *Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions* 71: 281–309.

Pellinen T.K., Xiao S. 2005. *Stiffness of Hot-Mix Asphalt*. Research report. DOI: 10.5703/1288284313390.

Perl M., Uzan J., Sides A. 1983. Visco-elasto-plastic constitutive law for bituminous mixture under repeated loading *Transportation Research Record 911*. Washington, DC: Transportation Research Board.

Petersen J.C., et al. 1994. *Binder characterisation and evaluation, vol 4: Test methods*.

Van der Poel C. 1954. A general system Describing the viscoelastic properties of bitumens and their relations to routine test data, *Journal of Applied Chemistry* 4: 221–236.

Puzinauskas V.P. 1979. Properties of Asphalt Cements, *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists* 48: 646–710.

Qiao Y., Dawson A., Huvstig A., Korkiala-Tanttu L. 2014. Calculating rutting of some thin flexible pavements from repeated load triaxial test data, *International Journal of Pavement Engineering* 16(6): 467–476. DOI: 10.1080/10298436.2014.943127.

Raad L., Figueroa J.L. 1980. Load response of transportation support systems, *Transportation Engineering Journal, ASCE* 106(TE1): 111–128.

Read J., Whiteoak D. 2003. *The Shell Bitumen Handbook* Fifth edit, London, UK: Thomas Telford.

Rimša V. 2014. Dalelių kompozito diskretusis modelis *Dissertation of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering of Vilnius Gediminas technical university. Vilnius: 116*.

Rimša V., Kačianauskas R., Sivilevičius H. 2014. Numerical analysis of asphalt mixture and comparison with physical Marshall test, *Journal of Civil Engineering and Management* 20(4): 570–580. DOI: 10.3846/13923730.2014.920413.

Roque R., Buttlar W.G. 1992. The Development of a Measurement and Analysis System to Accurately Determine Asphalt Concrete Properties Using The Indirect Tensile Mode,

Journal of the Association of asphalt Technologists 61: 304–332.

Rowe G. 2009. Phase angle determination and interrelationships within bituminous materials *Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials*. CRC Press. DOI: 10.1201/9780203092989.ch5.

Rowe G., Baumgardner G., Sharrock M. 2009. Functional forms for master curve analysis of bituminous materials *Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials*. CRC Press. DOI: 10.1201/9780203092989.ch9 .

Rowe G., Sharrock M. 2011. Alternate Shift Factor Relationship for Describing Temperature Dependency of Viscoelastic Behavior of Asphalt Materials, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2207(1): 125–135. DOI: 10.3141/2207-16.

Rowe G., Sharrock M. 2001. Development of standard techniques for the calculation of master curves for Linear-visco elastic materials, *Journal of Applied Asphalt Binder Technology* 1(1): 72–81.

Rowe G.M., Bouldin M.G. 2000. Improved Techniques to Evaluate the Fatigue Resistance of Asphaltic Mixtures, *2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress Barcelona 2000*: 754–763.

Rowe G.M., Brown S.F., Sharrock M.J., Bouldin M.G. 1995. *Viscoelastic Analysis of Hot Mix Asphalt Pavement Structures*, Washington, D.C, USA: Transportation Research Board.

Rowe G.M., Sharrock M.J., D'Angelo J. a., Huber G. 2009. Evaluation of HMA E* Variation in Pavement Structures with Materials Produced for the Binzhou Expressway, Shandong, *Road Materials and Pavement Design* 10(sup1): 189–210.

Sayegh G. 1965. *Contribution à l'étude des propriétés viscoélastiques des bitumes purs et des bétons bitumineux*. Faculté des Sciences de Paris.

Scarpas A. 2005. *A Mechanics based Computational Platform for Pavement Engineering*. Delft University of Technology.

Scarpas A. 2000. *CAPA-3D finite element system users manual I, II, and III*, Delft.

Schapery R. a., Park S.W. 1999. Methods of interconversion between linear viscoelastic material functions. Part II—an approximate analytical method, *International Journal of Solids and Structures* 36(11): 1677–1699. DOI: 10.1016/S0020-7683(98)00060-2 .

Schindler K. 2008. Untersuchung des Verformungsverhaltens von Asphalt zur Bestimmung von Materialkennwerten für die Dimensionierung.

Seed H.B., Chan C.K., Lee C.E. 1962. Resilience Characteristics of Sub grade Soil and their Relation to Fatigue Failures in Asphalt Pavements *International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavement*. , Ann Arbor: University of Michigan.

Shell 1978. *Shell pavement design manual: Asphalt pavements and overlays for road traffic*, London.

Shook J.F., Kallas B.F. 1969. Factors Influencing Dynamic Modulus of Asphalt Concrete, *Proceeding of Association of Asphalt Paving Technologist* 38: 140–178.

Siddharthan R.V., Krishnamenon N., Sebaaly P.E. 2000. Finite-layer approach to

- pavement response evaluation *Conference on Geotechnical Aspects of Pavements 2000. Transportation Research Record No. 1709.*, Washington, DC: National Academy Press.
- Sides A., Uzan J., Perl M. 1985. A comprehensive visco- elastoplastic characterization of sand-asphalt under compression and tension cyclic loading, *Journal of Testing and Evaluation* 13: 49–59.
- Simonen M., Blomberg T., Pellinen T., Makowska M., Valtonen J. 2013. Curing and ageing of biofluxed bitumen: a physicochemical approach, *Road Materials and Pavement Design* 14(1): 159–177. DOI: 10.1080/14680629.2012.755933 .
- Speth O. 1985. *Versuchsstrecke Hilpoltstein, Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen. Heft 95 [Roadway Hilpoltstein. Research from the Road Administration. Issue 95]*, Bonn.
- Sui C., Farrar M.J., Harnsberger P.M., Tuminello W.H., Turner T.F. 2011. New Low-Temperature Performance-Grading Method Using 4-mm Parallel Plates on a Dynamic Shear Rheometer, : 43–48. DOI: 10.3141/2207-06 .
- Sveinsdóttir B.Ö. 2011. *Pavement Behavior Evaluation during Spring Thaw based on the Falling Weight Deflectometer Method.*
- Thom N. 2008. *Principles of Pavement Engineering* Thomas Telford.
- TRA Asfaltas 08 2009. *Automobilių kelių asfalto mišinių techninių reikalavimų aprašas TRA Asfaltas 08*, Vilnius.
- Traxler R.N., Schweyer H.E., Romberg H.W. 1944. Rheological Properties of Asphalt, *Industrial and Engineering Chemistry* 39(9): 823.
- Ullidtz P. 1998. *Modeling Flexible Pavement Response and Performance I*, Lyngby: Technical University of Denmark. Polyteknisk Forlag.
- Ullidtz P. 1987. *Pavement Analysis*, Amsterdam; New York: Elsevier.
- Underwood B.S., Kim Y.R. 2009. Determination of the appropriate representative elastic modulus for asphalt concrete, *International Journal of Pavement Engineering* 10(2): 77–86. DOI: 10.1080/10298430701827668
- Uthus L., Hopkins M. a., Horvli I. 2008. Discrete element modelling of the resilient behaviour of unbound granular aggregates, *International Journal of Pavement Engineering* 9(6): 387–395. DOI: 10.1080/10298430802169382
- Vaitkus A. 2007. Geotekstilių parinkimo metodai Lietuvos automobilių kelių ir gatvių konstrukcijoms *Dissertation of Civil engineering, Department of Roads of Vilnius Gediminas technical university. Vilnius: 115.*
- Vaitkus A. 2010. Geotextile Selection Methods for the Lithuanian Road and Street Structures, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 5(4): 246–253. DOI: 10.3846/bjrbe.2010.33 .
- Vaitkus A., Čygas D., Laurinavičius A., Juzėnas A.A. 2007. Evaluation of Geotextiles Separation Performance on the Impact of Transport Loads: Experimental Research – Stage I, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* II(1): 45–50 Prieiga per internetą: <http://www.bjrbe.vgtu.lt/volumes/en/volume2/number1/06.php>.
- Vaitkus A., Čygas D., Laurinavičius A., Vorobjovas V., Perveneckas Z. 2016. Influence

of warm mix asphalt technology on asphalt physical and mechanical properties, *Construction and Building Materials* 112: 800–806. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.212 .

Vaitkus A., Laurinavičius A., Oginskas R., Motiejūnas A., Paliukaitė M., Barvidienė O. 2012. The Road of Experimental Pavement Structures: Experience of Five Years Operation, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 7(3): 220–227. DOI: 10.3846/bjrbe.2012.30

Vaitkus A., Šiukščius A., Ramūnas V. 2014. Regulations for use of geosynthetics for road embankments and subgrades, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 9(2): 88–93. DOI: 10.3846/bjrbe.2014.11 .

Vaitkus A., Vorobjovas V. 2013. Use of local aggregates in high modulus asphalt concrete layers, *Grėdevinar* 65(4): 353–360.

Vaitkus A., Vorobjovas V., Jagniatinskis A., Andriejauskas T., Fiks B. 2014. Peculiarity of low noise pavement design under Lithuanian conditions, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 9(2): 155–163. DOI: 10.3846/bjrbe.2014.20 .

Vaitkus A., Vorobjovas V., Kleizienė R. 2015. *Automobilių kelių dangų konstrukcijų skaičiavimo diegimas (II etapas)*, Vilnius, Lithuania.

Vaitkus A., Vorobjovas V., Kleizienė R., Šernas O., Žiliūtė L. 2013. *Resistant to plastic deformation (rutting) asphalt pavement modeling, design and research in Vilnius city streets [Vilniaus miesto gatvių asfalto dangų, atsparių plastinių deformacijų (provėžų) susidarymui, modeliavimas, projektavimas ir tyrimai]*, Vilnius, Lithuania.

Velasquez R., Zofka A., Turos M., Marasteanu M.O. 2011. Bending beam rheometer testing of asphalt mixtures, *International Journal of Pavement Engineering* 12(5): 461–474. DOI: 10.1080/10298430903289956

Wang H. 2011. *Analysis of Tire-Pavement Interaction and Pavement Responses Using a Decoupled Modeling Approach*.

Wang Q. 2008. *Improvement of structural modeling of flexible pavements for mechanistic-empirical design*. University of Minnesota. Ann Arbor, MI: ProQuest Information & Learning Company.

Williams M.L., Landel R.F., Ferry J.D. 1955. The Temperature-Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-Forming Liquids, *Journal of the American Chemical Society* 77: 3701–3706.

Witczak B. Development of a New Revised Version of the Witczak E* Predictive Model for Hot Mix Asphalt Mixtures.

Witczak M.W. 2005. *Simple Performance Tests: Summary of Recommended Methods and Database*. NCHRP report 547, Washington, D.C, USA. Prieiga per internetą: http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_547.pdf.

Witczak M.W., Bonaquist R. 2000. *Rheological Characterization of the FHWA-ALF Binders*.

Witczak M.W., Kaloush K., Pellinen T., El-Basyouny M., Quintus H. Von 2002. *Simple Performance Test for Superpave Mix Design*. Prieiga per internetą: http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_465.pdf.

Witczak M.W., Mirza M.W. 1999. *Development of Relationships to Predict Poisson's Ratio for Paving Materials*, College Park, MD.

Xu Q., Mohammad L.N. 2008. Modeling Asphalt Pavement Rutting under Accelerated Testing, *Road Materials and Pavement Design* 9(4): 665–687. DOI: 10.3166/rmpd.9.665-687.

Zofka A., Marasteanu M., Li X., Clyne T., McGraw J. 2005. Simple Method to Obtain Asphalt Binders Low Temperature Properties from Asphalt Mixtures Properties, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* 74: 255–282.

Zofka A., Marasteanu M., Turos M. 2008. Investigation of Asphalt Mixture Creep Compliance at Low Temperatures, *Road Materials and Pavement Design* 9(sup1): 269–285. DOI: 10.1080/14680629.2008.9690169.

Zofka A., Urbanik A., Maliszewski M., Bankowski W., Sybilski D. 2014. SITE SPECIFIC TRAFFIC INPUTS FOR MECHANISTIC-EMPIRICAL PAVEMENT DESIGN GUIDE IN POLAND *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting. January 12-16, Washington, D.C.*, Washington D.C.

Zofka A.M. 2007. *Investigation of Asphalt Concrete Creep Behavior Using 3-point Bending Test*. University of Minnesota.

Zube E., Skog J. 1969. Final Report on Zaca-Wigmore Asphalt Test Road, *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists* 38.

Žiliukas A. 2004. *Medžiagų mechanika*, Kaunas: Technologija.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Vaitkus, A.; Vorobjovas, V.; Gražulytė, J.; Kleizienė, R.; Šernas, O.; Tumavičė, A. 2014a. Design solutions for pavements structure affected by static and impact load. *The Baltic journal of road and bridge engineering*. 9(4): 269–275. ISSN 1822-427X (ISI Web of Science; IF: 0,519).

Vaitkus, A.; Čygas D.; Laurinavičius, A.; Vorobjovas, V.; Kleizienė, R. 2012a. Research of asphalt layer bonding in Lithuanian pavement structures. *Građevinar*. 64(11): 915–921. ISSN 0350-2465 (ISI Web of Science; IF: 0,202).

Vaitkus, A.; Vorobjovas, V.; Žiliūtė, L.; Kleizienė, R.; Ratkevičius, T. 2012. Optimal selection of soils and aggregates mixtures for a frost blanket course of road pavement structure. *The Baltic journal of road and bridge engineering*. 7(2): 154–159. ISSN 1822-427X (ISI Web of Science; IF: 0,519).

Vaitkus, A.; Vorobjovas, V.; Šernas, O.; Gražulytė, J.; Tumavičė, A.; Kleizienė, R. 2016. The algorithm for selection of asphalt mixture resistant to plastic deformation. *Автомобильные дороги и мосты: научно-технический журнал. Минск : РУП "БелдорНИИ"*. 1(17): 36–42. ISSN 2225-9082.

Straipsniai kituose leidiniuose

Žalimienė, L.; Motiejūnas, A.; Kleizienė, R.; Gribulis G.; Kravcovas I. 2016. Temperature and moisture variation in pavement structures of the test road. Transportation research procedia. Transport Research Arena TRA2016, April 18–21. 14:778–786. ISSN 2352-1465.

Kleizienė, R.; Vaitkus, A.; Čygas, D. 2015. Axial load distribution corresponding to vehicle type and gross weight. 2015 International conference on Applied Mechanics and Mechatronics Engineering (AMME 2015), October 25–26, 2015, Bangkok, Thailand. p. 99-104. ISBN 9781605950211.

Vaitkus, A.; Čygas, D.; Kleizienė, R. 2014b. Research of asphalt pavement rutting in Vilnius city streets. 9th International Conference "Environmental Engineering", May 22–23, 2014. p. 1–9. ISSN 2029-7092.

Vaitkus, A.; Gražulytė, J.; Kleizienė, R. 2014c. Influence of static and impact load on pavement performance. 9th International Conference "Environmental Engineering", May 22–23, 2014. p. 1–9. ISSN 2029-7092.

Summary in English

Introduction

Problem formulation

Transport efficiency and mobility are priority areas in economic promotion strategies of the European Commission. These areas are inseparable from transport network infrastructure and its development and maintenance program. Transport network infrastructure has to ensure safe, fast, and comfortable travel from A to B. The development and modernisation of road network infrastructure in Lithuania is increasing. However, due to lack of investment the proper solutions are not always accepted.

More and more often the distresses emerged before the inter-repair in the newly designed and constructed asphalt pavement. Pavement is design according to a standardized catalogue of pavement structure which is based on empirical methods in Lithuania. This standardized catalogue does not always reflect the actual pavement performance conditions. The asphalt pavement durability and efficiency is related to many factors starting from the structure design, construction quality, operation conditions, and finally maintenance activities. Current and new pavement design methods are improved and invented in order to reduce the probability of premature pavement deterioration. Specialized asphalt pavement design methods as well as assessments of mechanical properties of layer materials and pavement performance are applied in other leading countries. To develop cost-effective maintenance of the Lithuanian road network, the state needs an

innovative (advanced) asphalt pavement design adapted according to environmental and traffic load condition evaluation.

This scientific work focuses on flexible pavement design, mechanical property determination, and analysis methods. It explores the ability to determine the dynamic modulus of asphalt mixture from its component properties, and apply these values for advanced pavement design and performance evaluation.

Relevance of the thesis

Safe, functional, comfortable, qualitative, and economical road network infrastructure is a priority for every developed country. The condition of road infrastructure reflects the economic level of the state.

Flexible asphalt pavement is most common in Lithuania due to well-known technology, quick construction, and easy maintenance. Asphalt pavement structures are used for motorized (cars and motorcycles) and non-motorized (bicycle and pedestrian) traffic zones, as well as the terminal infrastructure of air and water transport and the special-purpose yards of cargo handling storage sites and platforms.

Asphalt pavement in Lithuania is designed referring to a standardized pavement structure catalogue (KPT SDK 07) that is based on experience and historical-empirical observation. In some cases, the standardized catalogue becomes ineffective, such as when new or reconstructed pavement deteriorates more quickly than it was designed to. This is particularly relevant in road sections where the design load was underestimated (with overloaded vehicle traffic), as well as areas where acceleration, deceleration, and static loads can appear. Likewise, climate change, unusual high and low temperature extremes, as well as increment of their frequency and duration affect pavement and lead to different performance and deterioration than was empirically observed in the past. The road surface and pavement operates under aggressive and difficult to forecast traffic loads and temperature conditions. Therefore, the pavement design methods and empirical models must be periodically updated and revised.

The pavement design and tests methods have been used in developed countries enables to evaluate the mechanical properties of layer materials, pavement response to traffic loads under certain temperature, and forecast pavement performance. The pavement performance forecast and layer thickness optimization can be done after determining the visco-elastic properties of asphalt mixtures. These methods lead to design non-standard pavement structures and analytically evaluate the application of new materials and mixtures. The optimisation of pavement layer thickness and determination of actual mechanical properties of constructed pavement ensures more efficient use of road infrastructure development and maintenance funds.

The object of research

The application of dynamic modulus of new, aged, and cored asphalt mixtures from top, bottom, and base layers, determined using predictive model from the visco-elastic properties of the asphalt binder, to flexible pavement design and pavement performance forecast.

The aim of the thesis

Improve the flexible pavement design integrating the pavement performance model based on visco-elastic properties of asphalt.

The tasks of the thesis

The following tasks were accomplished to achieve the thesis aim:

1. Select, analyse, and specify the scientific research results of the asphalt pavement response, the visco-elastic behaviour of asphalt layers, the behaviour of unbound layers, and pavement performance.
2. Test and determinate the physical and mechanical properties of fresh, aged, and cored from exploit pavement asphalt mixtures. Determine the dynamic complex and dynamic shear modulus for asphalt mixtures and bitumen, and construct the mastercurve applying time-temperature superposition principle.
3. Calculate the dynamic complex modulus of asphalt mixtures based on the dynamic shear modulus of asphalt binder and volumetric mixture composition. Implement the Hirsch modulus for dynamic modulus mastercurve construction of asphalt mixtures.
4. Determine elastic and visco-elastic asphalt mixture behaviour parameters for pavement response calculations.
5. Estimate the influence of asphalt visco-elastic properties to new and operating pavement performances. Evaluate these pavement responses under load at different temperature intervals.
6. Determine and evaluate the economic efficient of separate asphalt pavement design methods.
7. Present recommendations for determination of viscoelastic properties of asphalt mixtures and application for flexible pavement design.

The research methodology

Analytical, numerical, experimental, and statistical methods are applied for achieving the thesis goals. Experimental methods covers the physical (needle penetration, softening point, volumetric and granular content, as well as binder content tests) and (linear visco-elastic range, dynamic shear modulus and dynamic modulus tests) mechanical properties determination of asphalt binders and mixtures. Results are analysed applying the statistical methods such as normality, Student, and Kolmogorov-Smirnov tests. Flexible pavement response estimated using the analytical methods based on multilayer elastic theory with elastic and visco-elastic material properties.

The Hirsch model is used for the dynamic modulus of asphalt mixture estimation based on mixture volumetric content and binder mechanical properties. The mastercurve of dynamic modulus is constructed according to the Gordon-Shaw method assuming the validation of time-temperature superposition principle. Multilayer theory is applied for pavement structure response calculations. The visco-elastic behaviour of asphalt layers under time and temperature is based on the Huet-Sayegh model.

Scientific novelty of the thesis

Road technology and civil engineering achieve the following significant scientific results:

1. Development of a theoretical algorithm (design model) for asphalt layers visco-elastic property influence on pavement structure performance determination.
2. Composition of three unstandardized experimental procedures:
 - a) Linear visco-elastic range for bitumen determination under dynamic shear rheometer;
 - b) Linear visco-elastic range for asphalt mixtures determination under dynamic indirect tension test;
 - c) Dynamic modulus for asphalt mixture determination under dynamic indirect tension test (IDT).
3. Dynamic modulus of asphalt mixtures determination under IDT implementation for mastercurve construction for the first time in national level;
4. Improvement and calibration of the Hirsch model for dynamic modulus of asphalt mixtures estimation based on volumetric content of mixtures and master-curve of dynamic shear modulus of bitumen binder.

Practical significance of research findings

Developed design model of the flexible pavement performance based on asphalt visco-elastic properties can be used for pavement layer thickness optimisation. Pavement structure designed according to presented algorithm was up to 8% lower construction expenses compared to pavement design according to the standard catalogue (KPT SDK 07).

The specified Hirsch model for the dynamic modulus prediction based on volumetric content and component properties of the asphalt mixtures (SMA 11 S, AC 16 AS, AC 22 PS and AC 32 PS) assures good reliability and can be used for pavement design. The main variable in this model is the dynamic shear modulus of the binder, which was determined performing the frequency sweep test with DSR. This model application allows to relatively fast and accurate of the mechanical properties of asphalt mixture determination.

Defended statements

1. Pavement performance should be determined during pavement design and based on visco-elastic asphalt layers properties;
2. The dynamic modulus of asphalt layer determined under load, frequency, time and temperature defines asphalt behaviour (response) in flexible pavement.

Approval of the research findings

Eight research articles in scientific journals have been published under this dissertation topic, three of which are included in the ISI Web of Science database.

Part of the analytical research was applied in the “The model of pavement structure resistant to static and impact loading adapted to changing climate conditions” project

financed by the European social fund and in the “Implementation of pavement design for road” project financed by the Lithuanian Road Administration under the Ministry of Communication.

The advanced pavement design model concept was presented in two working seminars in Latvia and Estonia. The topic of the dissertation research results was published in four scientific conferences in Lithuania and abroad:

- International conference „*CETRA 2014: The 3rd international conference on road and rail infrastructures*“, 2014, Split;
- International conference „*The 9th International Conference „Environmental Engineering*“, 2014, Vilnius;
- International conference „*International conference on Applied Mechanics and Mechatronics Engineering (AMME 2015)*“, 2015, Bangkok;
- International conference „*The 6th European Transport Research Conference MOVING FORWARD: Innovative Solutions for Tomorrow's Mobility*“, 2016, Warsaw.

Structure of the dissertation

The dissertation consists of an introduction, three chapters, general conclusions, recommendations, a list of references, list of published scientific works on the topic of the dissertation, summary in English, and annexes. The total scope of the scientific work is 159 pages (without annexes), 59 numbered formulas, 62 figures, and 21 tables. The thesis was based on a review of 239 literature sources.

1. Analysis of the asphalt pavement design and performance methods

Usually the flexible (asphalt) pavement is designed by selecting the layer thickness and material from standardized catalogue of pavement structures according to the total number of equivalent axles. This approach is mostly based on empirical data and underestimates the pavement responses, damage and performance. The advanced pavement design methods based on mechanical properties of materials allow prediction of pavement performance and evaluation of the structure resistance to fatigue and permanent deformation.

The pavement design concept based on performance is filled by following: 1) determine the needed minimum thickness of resistant to frost; 2) assume pavement layers thickness and select (or determine) the materials as well as their mechanical properties under expected subgrade condition; 3) compute the response (stress and strains) in the pavement under load, temperature, and moisture conditions; 4) determine the limit loads (or stresses) corresponding to pavement performance criteria; 5) confirm the Minner rule: the design loads should be less than limit loads over all pavement design life; 6) if Minner rule is true - the design pavement structure should perform well, if no – the additional calculations should be done by changing the layer thickness or materials. Similar pavement design concept is developed in the US, and called Mechanistic-empirical pavement design guide (MEPDG), however this procedure is more sophisticated, cali-

brated with more than twenty years of actual pavement exploitation conditions and allows to predict separate pavement distresses (NCHRP 1-37A 2004).

During pavement design the structure response under load are computed in critical locations of stress and strain. Stress and strain applied in pavement performance models allows estimating limit loads of pavement's resistance to (Hogentogler *et al.*, 1929; Rowe *et al.* 2000; Di Benedetto *et al.*, 1996; Lundström *et al.*, 2007; Christensen *et al.* 2012): fatigue cracking – strain in the bottom of asphalt base layer; longitudinal cracking – strain in the of asphalt surface; hydraulically bound base fatigue cracking – strain in the surface of base layer; permanent deformation – stress in the top of the unbound base, subbase layers and subgrade.

Pavement response can be determined with different type of analytical methods based on the multi-layered, equivalent thickness, finite element, and discrete element theories. In each case, boundary conditions, assumptions, as well as input data are the main differences. Though, the materials properties are the fundamental and also depend on selected analytical method. In most cases the multilayer-elastic theory is used for flexible (asphalt) pavement design and response estimation, where materials are described over Yung modulus and Poisson ratio. Because of bituminous binder the asphalt mixture behaves as visco-elastic material at most loading and temperatures. This visco-elastic behaviour of asphalt layers should be also evaluated at specific traffic loading and climate conditions, consequently the pavement responses and performances estimated. In order to do so, the complex modulus and phase angle of asphalt mixtures have to be determined at various temperature and dynamic loading frequency conditions. At linear visco-elastic range the asphalt mixture and binder behaviour are assumed to be thermorheologically simple, which means that time-temperature superposition principle can be used for complex modulus master curve construction. The complex modulus and phase angle mastercurve fully describes the behaviour of asphalt mixture and could be applied for analytical methods and pavement design concepts.

The implementation of mechanistic-empirical pavement design for flexible pavement firstly demands to specify the temperature and traffic load data, mechanical properties of layer materials in order to estimate pavement responses. Performance models must to be calibrated at local conditions. This thesis is focused on complex modulus (as an visco-elastic behaviour property) of asphalt mixture investigation and its implementation for flexible pavement design. The main idea was to determine the asphalt layers properties from paved structures. For this the indirect tension test (IDT) was select due to ability testing layers up to 4 cm thick. Several researches were carried out for dynamic complex modulus under IDT mode (Momen 2004; Pellinen *et al.* 2005; Ping *et al.* 2008). Indirect tension test for asphalt mixture at higher temperatures obtains larger error margins, and should be carefully performed at linear visco-elastic (LVE) range. As complex modulus tests of asphalt mixtures are expensive and time consuming, the complex modulus prediction model was also investigated.

The visco-elastic properties of asphalt mixtures can be determined and predicted (estimated) using Olard-DiBenedetto, Andrei-Witczak, Hirsch or similar models. These models evaluate bitumen viscosity or dynamic shear modulus and the volumetric composition mixtures. Pellinen *et al.* (2007) investigated the application of different prediction models and the calculation errors. Researchers emphasized that these models should

be used with caution in assessing the characteristics of the asphalt mixture at high temperatures, where the average prediction errors up to 40%, while the experimental error of the test results - 20% (Pellinen *et al.* 2007).

The Hirsch model adaptation is also analysed in this research work to predict the complex modulus of asphalt mixture. The Hirsch model selected because it is not related to specific gradation and sieve sizes or glass modulus assumptions. Christensen *et al.* (2003) presented Hirsch model (S.1.1, S.1.2 and S.1.3 formulas) of asphalt mixture dynamic modulus calculations. Also, this model has been adapted in NCHRP 567 project (Christensen *et al.* 2006) to identify and evaluate the asphalt components of the mixture composition on the mechanical properties of the mixture. However, the complex modulus prediction models have to be compared with actual test results and calibrated towards nationally standardized mixtures, materials and test conditions.

$$\begin{aligned} |E^*|_{mix} = & Pc \cdot \left(E_a \cdot \left(1 - \frac{VMA}{100} \right) + 3 |G_b^*| \cdot \left(\frac{VFA \cdot VMA}{10000} \right) \right) + \\ & + (1 - Pc) \cdot \left(\frac{1 - \frac{VMA}{100}}{E_a} + \frac{VMA}{3 \cdot VFA |G_b^*|} \right)^{-1}, \end{aligned} \quad (S.1.1)$$

$$Pc = \frac{\left(P_0 + \frac{VFA \cdot |G_b^*|}{VMA} \right)^{P_1}}{P_2 + \left(\frac{VFA \cdot 3 |G_b^*|}{VMA} \right)^{P_1}}, \quad (S.1.2)$$

where Pc – represent the contact area of aggregate; E_a – the elastic modulus of the aggregate, psi²; VMA – voids in the mineral aggregate (without mineral filler), %; VFA – voids of the aggregate filled with mastic, %; $|G_b^*|$ – dynamic shear modulus of the binder, psi; P_0, P_1, P_2 – empirically determined constants; φ - phase angle of the mixture, °.

According to literature analysis, the model for flexible pavement design based on visco-elastic properties of asphalt mixtures is presented:

- 1) determine physical properties of new, aged and cored asphalt mixtures and their bitumen;
- 2) determine mechanical properties (dynamic shear and complex modulus) under linear visco-elastic range of asphalt mixtures and bitumen;
- 3) using Hirsch model predict the complex modulus of asphalt mixtures from mixture volumetric composition and bitumen shear modulus;

- 4) compare measured and predicted complex modulus at the load and temperature conditions;
- 5) minimize error by calibrating the fitting coefficients of Hirsch model;
- 6) construct the mastercurve of predicted complex modulus and define the visco-elastic behaviour with Huet-Sayet rheology model;
- 7) estimate response of new and aged pavement structures based on elastic and visco-elastic properties of asphalt;
- 8) determine the performance of two structures with three design concepts;
- 9) optimize pavement structures corresponding to pavement performance criteria;
- 10) determine the economic efficiency for advanced pavement design application.

Summarising the first chapter it should be pointed out, that since twenty years ago in Lithuania the road pavement is still designed using standardized pavement design catalogue, according to equivalent 10 tons axle load and not taking into consideration the pavement performance. The application of complex modulus prediction and complex modulus mastercurve of asphalt mixtures were investigated for the first time in Lithuania.

2. Experimental research of the asphalt visco-elastic properties determination

The experimental research aim is to investigate the visco-elastic properties of different ages and course asphalt mixture, and determine input data for flexible pavement design. Seven asphalt mixtures and their binders were tested during this research. Mixtures were cored from three layers (wearing, binder, base) of pavement constructed in 2007. The other four produced in the batch plant in 2015. All mixtures investigated at the same experimental conditions. The flow chart of experimental research of asphalt and bitumen mixture is presented in figure S.2.1. The specification of asphalt mixtures and bituminous binders is presented in table S.2.1.

At the beginning of experimental research the penetration and softening point was tested for bitumen in order to determine the grade and the grade change after ageing. The results revealed that the needle penetration for all binder was lower than required except the first PMB 45/80-55 (01-P-A). The softening point results didn't show significant change between binders. The dynamic mechanical behaviour of binder tested with dynamic shear rheometer (DSR) under oscillation test mode by applying a sinusoidal shear strain to the sample at set angular frequency. The strain sweep (from 0,05% to 32%) test under maximum frequency (15.6 Hz) at lower (10°C and 46°C) and higher (46°C and 82°C) temperatures (for each plates geometry) were performed to determine the safe strain at linear visco-elastic (LVE) range. 5% decrease of the initial value of the shear modulus is assumed to be the threshold of LVE range (Anderson *et al.* 1994; Marasteanu *et al.* 2000; Airey *et al.* 2003). The dynamic shear modulus and phase angle was determined from the frequency sweep (from 0.156 to 15,6 Hz) tests, which were performed at constant LVE strain and various temperatures (from 46°C to 10°C with 8 mm geometry and from 46°C to 82°C with 25 mm, with increase every 6°C). Unshifted dynamic shear modulus isotherms were applied to Hirsch model.

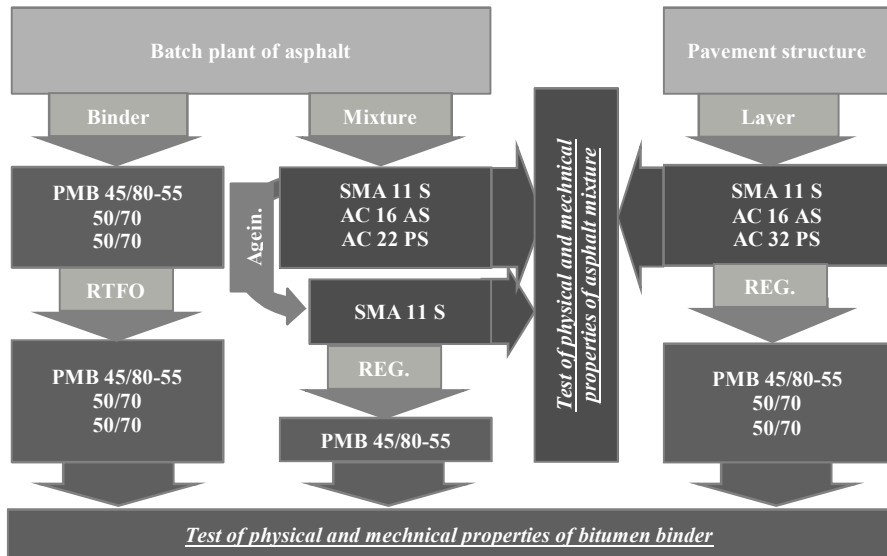


Fig. S.2.1. The flow chart of experimental research of asphalt mixtures and bitumen

Table S.2.1. The specification of asphalt mixtures and bituminous binders

Characteristic	Labels and specification						
Asphalt mixture type	SMA	AC	AC	SMA	SMA	AC	AC
Maximum aggregate size, mm	11	16	22	11	11	16	32
Layer of asphalt mixture ¹	V	A	P	V	V	A	P
Code of asphalt mixture	01-P-N	02-B-N	03-B-N	04-P-S	05-P-B	06-B-B	07-B-B
Code of binder	01-P-A	02-B-A	03-B-A	04-P-R	05-P-R	06-B-R	07-B-R
Production years	2015	2015	2015	2015	2007	2007	2007
Binder type	PMB 45/80-55	50/70	50/70	PMB 45/80-55	PMB 45/80-55	50/70	50/70
Asphalt mixture ageing	N ²	N ²	N ²	S ³	R ⁴	R ⁴	R ⁴
Binder ageing	RTFOT	RTFOT	RTFOT	Recovered	Recovered	Recovered	Recovered
Mineral type of aggregate ⁵	G	G	ŽV	G	G	G	D
¹ Mixture of wearing layer – V; Mixture of binder layer – A; Mixture of base layer – P.							
² New asphalt mixture after mixing in the batch plant.							
³ Long-term asphalt mixture ageing under laboratory conditions (loose mixture aged for 48h at 100°C).							
⁴ Mixture aged under natural conditions, cored from pavement structure of the Experimental road section No 12.							
⁵ Crushed granite – G; crushed gravel – ŽV; crushed dolomite – D.							

The Superpave® concept was used for mechanical behaviour analysis of tested binder. Asphalt pavement performance characteristics may be associated with bitumen

qualities, which are resistance to rutting, fatigue and thermal cracks (Kennedy *et al.* 1990; Lytton *et al.*, 1993, C-SHRP 1995). Superpave® bitumen specifications classified by the dynamic shear modulus and phase angle set at 10 rad/s. The determined limit of performance temperatures of tested binders based on resistance to fatigue and rutting are presented in figure S.2.2.

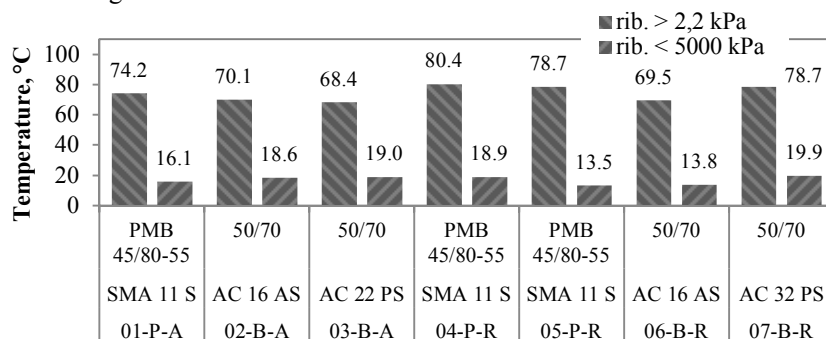


Fig. S.2.2. The limit performance temperatures of binder based on resistance to fatigue and rutting

According to dynamic modulus results, when binder ages the limit temperature at which asphalt mixture is resistant to permanent deformation increases. Comparing two binder types 1) recovered form naturally aged asphalt mixture and 2) after RTFOT - it was found that higher limit temperature of resistance to rutting differ by 4.5°C This PM binder is used for wearing layer, so this temperature change can be related with bitumen oxidation and hardening processes. Analysing the limit temperature of resistance to fatigue can be seen a decreasing trend when exploitation time increases.

Similarly, the asphalt mixtures were tested to get grading compositions, volumetric content as well as binder and air voids percentages. The closest grading compositions were determined for asphalt mixtures of wearing layer (SMA 11 S), however the big difference in grading was found for asphalt mixtures of base layer (AC 22 PS and AC 32 PS). The percentage of air voids was lowest for the mixture cored from aged pavement structure.

The dynamic mechanical behaviour of asphalt mixture tested with universal load frame under haversinusoidal dynamic compression loading when applying it indirectly to cylinder samples. The horizontal displacement in asphalt sample recorded every 0.5s with two LVDT sensors fixed to a frame, vertical displacement recorded from actuator sensor. The LVE range were determined by stress sweep (from 0.15kN to 9.0kN load with a 0.03kN contact load) test under constant frequency (5 Hz) at three temperatures (4°C, 22°C and 40°C). The threshold for test load to perform test under LVE range appeared to be not greater than 0.30% measured horizontal strain (FGSV 430 2009). The dynamic modulus and phase angle of mixtures was determined from the IDT frequency sweep (from 0.156 to 7 Hz) test, which was performed at constant load of LVE range at various temperatures (from 4°C to 34°C, with increase every 6°C). The modulus and phase angle were calculated taking the peak values of sinusoidal amplitude load and horizontal displacement from the last 10 cycles of each frequency stage. Calculations carried out referring to AL Sp-Asphalt 09 (FGSV 430 2009), standards (LST EN 12697-26

2012; LST EN 12697-24 2012; AASHTO T342-11 2013; AASHTO T322-07 2011) as well as in scientific research works (Pellinen *et al.* 2005; Zofka 2007). The comparison of asphalt mixture dynamic modulus measured at 1Hz presented in figure S.2.3.

The dynamic modulus of naturally aged (cored from pavement structure paved in 2007) asphalt mixtures is lower than the same type asphalt mixtures produced in 2015. The average 44% reduction of dynamic modulus determined for asphalt mixture of wearing layer (SMA 11 S (PMB 45/80-55), which was exploited for 8 years, comparing to the same type new mixture. The average decrease of dynamic modulus by 35% was also determined for asphalt mixture of base layer (AC 32 PS (50/70)) comparing to the similar type newly produced mixture (AC 22 PS (50/70)).

Analysing the dynamic modulus determined from laboratory aged asphalt mixture of wearing layer (SMA 11 S (04-P-S)) observed slight change comparing the dynamic modulus value from the same new mixture (01-P-N). It can be concluded that ageing asphalt mixture in laboratory conditions does not give expected impact to asphalt's mechanical behaviour comparing it with naturally aged. Therefore, the data from asphalt mixture SMA 11 S (04-P-S) wasn't analysed in the further pavement response and performance calculations.

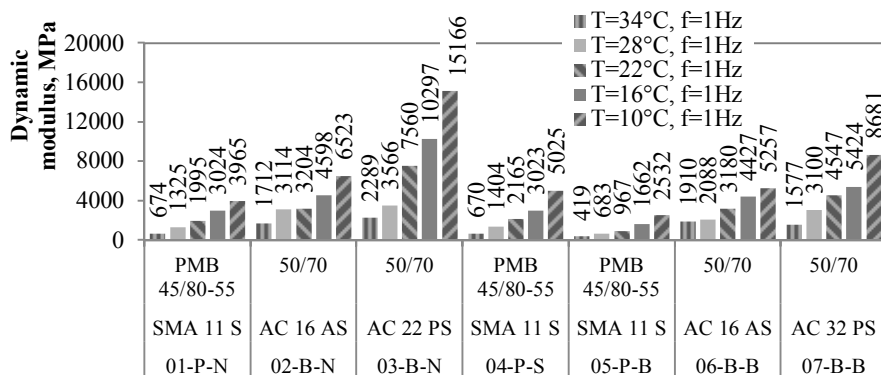


Fig. S.2.3. The comparison of asphalt mixtures dynamic modulus measured at 1Hz

The dynamic modulus prediction of asphalt mixtures was accomplished applying the Hirsch model (Christensen *et al.* 2003) and based on volumetric composition and mechanical behaviour of bitumen. This application was carried out in three basic analysis stages:

- 1) Checking of Hirsch model prediction adequacy and calibration of fitting coefficients:
 - Predict the initial $E_{C(\text{calc.})}^*$ using the Hirsch model with Christensen *et al.* (2003) coefficients ($E_a = 4200000$, $P_0 = 20$, $P_1 = 0,58$, $P_2 = 650$) at the same (overlapping) test conditions for both DSR and IDT (specifying at one frequency of 1 Hz and five temperatures 10-34°C);
 - Compare and error estimate the predicted dynamic modulus $E_{C(\text{calc.})}^*$ and observer $E_{(\text{meas.})}^*$;

- Revise and calibrate Hirsch model coefficients by minimising the prediction error.
- 2) Predicting dynamic modulus of asphalt mixture using revised Hirsch model:
 - Predict the complex dynamic modulus $E_{H(calc.)}^*$ of asphalt mixtures at each temperatures and frequencies (0.16 to 15.9 Hz and 10-82°C) corresponding to complex shear modulus of bitumen binder using Hirsch model with calibrated coefficients;
 - Construct the dynamic modulus $E_{H(calc.)}^*$ mastercurve with Gordon-Shaw method at reference temperature ($T_{ref.} = 22^\circ\text{C}$), fit the Generalised Richardson sigmoidal and polynomial functions for modulus mastercurve and shift factor points;
 - Estimate the predicted dynamic modulus at the same temperatures and frequencies conditions, which were performed for mixture test (at 10-34°C and 0.1-7.0 Hz), using determined functions.
- 3) Validating Hirsch's model (with revised coefficients) prediction relevancy:
 - Compare the predicted dynamic modulus $E_{H(calc.)}^*$ with observed $E_{(meas.)}^*$ and determine the final prediction errors;
 - Prove the prediction relevance with statistical analysis of normality, Fisher, Student, and Kolmogorov-Smirnov tests.

The percentage error of predicted and observed dynamic modulus was calculated using the formula S.2.4:

$$Err = \frac{(E_{C \text{ or } H(calc.)} - E_{(meas.)})}{E_{(meas.)}} \cdot 100 \% \quad (S.2.3)$$

The dynamic shear modulus of binders and dynamic complex modulus of asphalt mixtures tests' conditions overlap at frequency of 1 Hz and temperatures of 10°, 16°, 22°, 28° and 34°C (total number of variables 140). The percentage error of predicted (using Hirsch model with Christensen et al. (2003) coefficients) dynamic modulus $E_{C(calc.)}^*$ over observed $E_{(meas.)}^*$ (Fig. S.2.4) showed the average percentage error of 79.5% with a standard deviation of 109%.

In order to achieve reasonable percentage error, the fitting coefficients of Hirsch model needed to be adjusted by using least squares method. The determined Hirsch model coefficients after percentage error minimisation is presented in table S.2.3. In histogram S.2.4 it can be seen, that average percentage error were minimised to 0.164% with a standard deviation of 13.8%.

With calibrated Hirsch modulus further predictions of asphalt complex modulus were carried out with other frequencies and temperatures. Complex modulus isolines were determined at temperature ranges from 10 to 82°C under frequency range from 0.156 to 15.6 Hz. The isolines' pairs were shifted to fluent mastercurve by optimising vertical displacement between them applying Gordon-Shaw (1994) method. To get mastercurve function the Richards Generalized sigmoidal model was fitted. And the predicted dynamic modulus at mixture test conditions were estimated by using determined mastercurve functions and shift factors. Then the total percentages error of $E_{H(calc.)}^*$ and $E_{(meas.)}^*$ were estimated and presented in table S.2.4 and figure S.2.5.

Table S.2.2. Determined Hirsch model coefficients after percentage error minimisation

Mixture	Ageing	Revised coefficients of Hirsch model				R ²	Percentage error		
		E _a	P ₀	P ₁	P ₂		Mean	ST	P-value*
SMA 11 S	N	9.94E+05	19.1	0.72	7.75E+02	0.991	-3.1	7.71	0.188
AC 16 AS	N	5.54E+06	19.1	0.66	9.42E+02	0.961	-0.4	20.03	0.105
AC 22 PS	N	4.73E+08	307.5	0.35	1.61E+04	0.868	3.1	12.94	0.042
SMA 11 S	S	2.01E+07	21.1	0.54	6.79E+03	0.967	-2.3	13.02	0.246
SMA 11 S	B	1.60E+06	19.8	0.58	1.07E+03	0.993	3.7	6.77	<0.005
AC 16 AS	B	1.20E+06	9.2	0.53	9.57E+01	0.940	-2.8	13.50	0.012
AC 32 PS	B	9.78E+08	0.0	0.42	5.32E+04	0.950	2.8	17.32	0.049

* - P-value indicates the normality test for measured and predicted modulus error

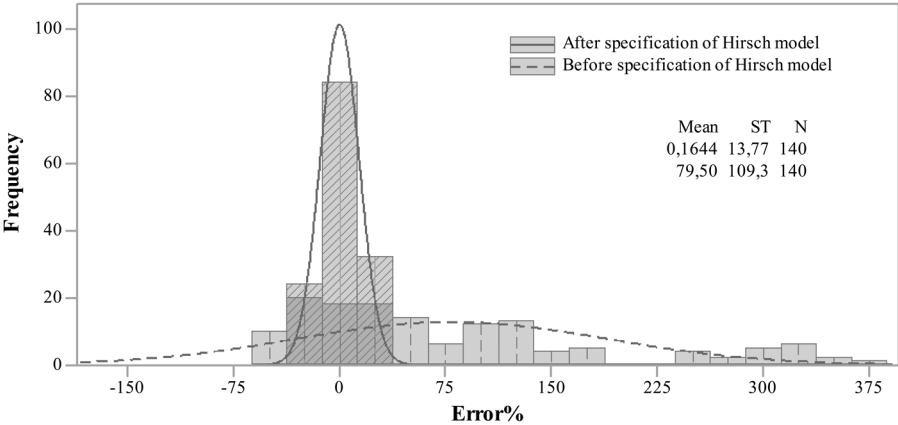


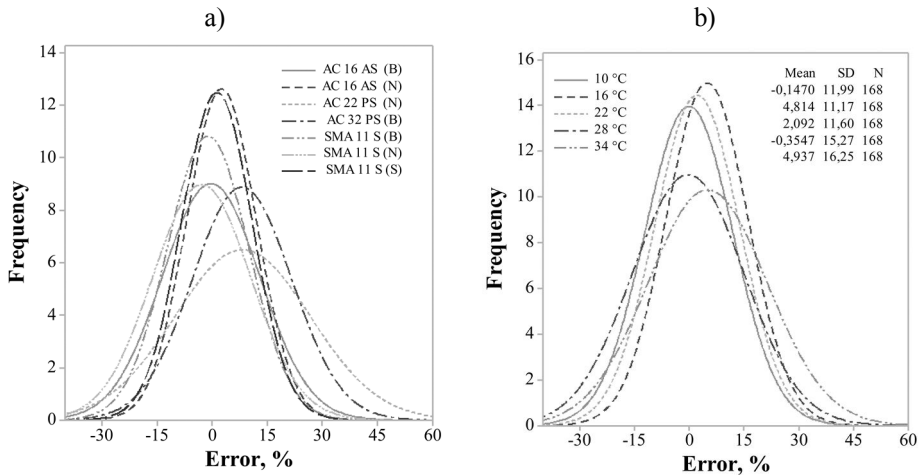
Fig. S.2.4. The histogram of percentage error of dynamic modulus (at 1 Hz) determined before and after coefficients calibration of Hirsch model

The smallest variance of percentage error was calculated when predicted dynamic modulus was used for AC 16 AS (N), and SMA 11 S (S) mixtures. This indicates that predicted modulus of these mixtures is the closest to the experimentally observed values. The maximum percentage error and its variance were calculated when predicted dynamic modulus was used for AC 22 PS (N) and AC 32 PS (B) asphalt mixtures. So, the calibrated Hirsch model allows prediction of dynamic modulus for asphalt mixtures of Lithuanian standards with the average error of 2.3% and standard deviation of 12.1.

The asphalt mixture of $E^*_{H(calc.)}$ and $E^*_{(meas.)}$ percentage errors normal distribution of temperature (Fig. S.2.5 b) shows that the highest accuracy and lowest percentage error scatter were calculated for modulus tested at 16 °C and 22 °C. As well as, maximum percentage error and high variance were calculated for modulus tested at 28 °C and 34 °C temperatures. Also, the percentage error highly depends on the accuracy of asphalt mixtures experiments.

Table S.2.3. The total percentages error of $E_{H(calc.)}^*$ and $E_{(meas.)}^*$ normal distribution analysis

Type of asphalt mixture (ageing)	Mean μ	Standard deviation SD	Variable N	Criteria of Anderson-Darling AD	P-value	Probability of 90 % accuracy	
						Min	Max
AC 16 AS (N)	2.55	9.49	120	0.670	0.078	-14.7	19.8
AC 16 AS (B)	-0.33	13.30	120	0.210	0.857	-24.5	23.8
AC 22 PS (N)	8.29	18.48	120	0.459	0.258	-25.2	41.8
AC 32 PS (B)	8.10	13.50	120	0.765	0.045	-16.4	32.6
SMA 11 S (N)	-2.89	13.35	120	0.637	0.094	-27.1	21.3
SMA 11 S (B)	-1.14	11.07	120	0.592	0.120	-21.2	18.9
SMA 11 S (S)	1.30	5.60	120	0.456	0.263	-8.9	11.5
Aver. error:	2.27	12.11				-19.7	24.3

**Fig. S.2.5.** The normal distribution of percentages error of $E_{H(calc.)}^*$ and $E_{(meas.)}^*$ comparison of asphalt mixtures according to: a) mixture type; b) temperature

The difference of distributions of predicted and observed dynamic modulus was tested with Student two-sample test, when checking the difference between the mean values. It was observed that there are no sufficient evidences stating that the distributions of predicted and observed modulus are different. Respectively the two samples Kolmogorov-Smirnov (K-S) test was done when checking, if the predicted and observed dynamic modulus data came from the same distribution (assuming $\alpha = 0.05$). It was also proved that there is no sufficient evidence stating that the predicted and measured dynamic modulus are different. As a result, the predicted dynamic modulus of asphalt mixtures estimated using calibrated Hirsch modulus and determined mastercurve functions were used for further pavement response and performance analysis.

The visco-elastic behaviour of asphalt mixtures was determined by the Huet-Sayegh rheological model (Huet 1963; Christian 1999; Sayegh 1965). Huet-Sayegh model (formula S.2.5.) is driven form dynamic modulus mastercurve. This model very accurately predicts both the bituminous binder and asphalt mixes visco-elastic behaviour

at any temperature and frequency (Di Benedetto *et al.* 2004; Duhamel *et al.* 2005; Chabot *et al.* 2010; Chupin *et al.* 2012). The mastercurve of dynamic modulus, phase angle and shift factors for each asphalt mixture were transformed to Huet-Sayegh model coefficients that are presented in table S.2.5.

$$E^* = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau(\theta))^{-k} + (i\omega\tau(\theta))^{-h}} \quad (\text{S.2.4})$$

Table S.2.4. The coefficients for Huet-Sayegh model at 20°C reference temperature

Type of asphalt mixture (ageing)	E_0	E_∞	δ	k	h	A_0	A_1	A_2
SMA 11 S (N)	57	5627	3.53	0.42	0.77	7.08	-0.370	0.00215
AC 16 AS (N)	1101	13961	9.34	0.40	0.40	6.80	-0.328	0.00074
AC 22 PS (N)	202	25483	4.77	0.36	0.82	7.11	-0.364	0.00186
SMA 11 S (S)	63	13233	11.69	0.37	0.37	6.90	-0.343	0.00130
SMA 11 S (B)	43	5874	8.21	0.36	0.36	7.09	-0.361	0.00177
AC 16 AS (B)	82	6038	1.00	0.39	0.39	7.03	-0.342	0.00091
AC 32 PS (B)	4	21747	7.10	0.31	0.31	7.09	-0.355	0.00148

In summary of the second chapter must be noted, that the linear visco-elastic ranges for dynamic modulus tests should be defined for each different mixtures and binder types. The predicted or observed dynamic modulus of asphalt mixture under pavement exploitation conditions (with determined temperature and load frequency), can be used for pavement performance evaluation. The constructed mastercurve of asphalt dynamic modulus led to adapt the rheological Huet-Sayegh model for analysis of visco-elastic behaviour.

3. Design and performance prediction of flexible pavement

Complex modulus of asphalt mixture implementation into flexible pavement design was executed in this order: 1) define the design parameters; 2) estimate the stress and strains (responses) under different conditions; 3) predict the pavement performance; 4) Evaluate economical efficiency. Two new and aged pavement structures were analysed with three pavement design approaches. Pavement response (stress and strain) was estimated under 10 t weight static and moving axial load at variable and constant temperatures.

The layers of analysed pavement structures had the same thickness. Unbound base layer and subgrade mechanical properties assumed to be elastic and the same, but the properties of the asphalt layers were different: DK I – the new pavement composed of: asphalt wearing (SMA 11 S (N)), binder (AC 16 AS (N)), and base (AC 22 PS (N)) layers; DK II – the aged pavement composed of: asphalt wearing (SMA 11 S (B)), binder (AC 16 AS (B)), and base (AC 22 PS (B)) layers, that were cored from the Road of experimental pavement sections. The aged pavement was exploited for 8 years and received about 0,6 million of equivalent standard axle load.

To evaluate elastic and visco-elastic behaviour of asphalt layers the pavement response was calculated by applying the multi-layered elastic theory based MNLAYER (Khazanovich *et al.* 2008) and VISCOROUTE2 (Chabot *et al.* 2010) software. The pavement responses were computed with three pavement design approaches: SK I – flexible pavement response under static load at constant 20°C temperature for all asphalt layers (applying elastic properties of all layers); SK II – responses under static load and evaluating the temperature variation within asphalt layers (applying elastic properties for all layers); SK III - pavement responses under moving load and evaluating the temperature variation within asphalt layers (applying visco-elastic properties for asphalt layers and elastic properties for other pavement layers).

The pavement response analysis revealed that the moving load (SK III) caused 20% (for DK I) and 19 % (for DK II) lower horizontal strain compared to static load (SK II). The decrease of horizontal strain percentages in separate pavement structures indicates that the visco-elastic properties influence on pavement structure response decreases with increasing of pavement age.

The pavement performance analysis was focused on the estimation of limit loads number, considering the asphalt base layer resistance to fatigue, unbound base layer and subgrade resistance to permanent deformation. The analysis of structural resistance to fatigue showed 51% (SK II) and 55,5% (SK III) lower limit load to asphalt fatigue of aged (DK II) pavement structure in comparison to similar new alternative (DK I) pavement. The analysis of structural resistance to permanent deformation showed that at surface temperature higher than 35°C the load influence on unbound base layer will be equally damaging irrespectively to pavement age or loading type.

The pavement design analysis showed that new and aged pavement structure can be optimized considering three main performance criterias by evaluating the responses under different pavement exploitation conditions.

General conclusions

Summarizing analytical and experimental results of the thesis, the following conclusions are formulated:

1. Analysis of scientific references has shown that there are no universal tests and analytical methods to identify visco-elastic asphalt properties, to estimate pavement responses and to predict pavement performance. Empirical methods mainly used in practice of pavement engineering.
2. Pavement design methods, based on analytical and experimental researches done in this thesis, allow combining the elastic and visco-elastic properties of materials and predicting pavement performance under certain temperatures and load conditions, which can be expected during exploitation.
3. The determined dynamic modulus of asphalt mixtures and complex shear modulus of bitumen binders allowed Hirsch model to be applied in order to calculate the prediction errors. The percentage errors were minimized invoking the statistical analysis methods by changing the fitting coefficients of the model. Comparing predicted with calibrated Hirsch model and experimentally observed dynamic modulus the mean parentage error of 2.3% with a 12.1 standard deviation was calculated.

Universality evidence of calibrated Hirsch model was not a part of this research. Therefore, the increase of percentage error when predicting the modulus for other asphalt mixture types should be considered.

4. The flexible pavement design based on experiment test data of visco-elastic behaviour of asphalt in aged pavement indicates the resistance to fatigue (limit load) decline comparing to the alternative new pavement structure. The analysis of pavement response and performance also showed that visco-elastic properties influence on responses decrease with exploitation time. Aging of bitumen and fatigue of asphalt cause higher horizontal strains into pavement during exploitation.
5. The evaluation of visco-elastic asphalt properties during pavement design allowed class III pavement optimization. According to economic analysis the optimized class III pavement structure has the same design period but it is about 8% less expensive than the equivalent pavement structure design that is currently used.
6. Applying the suggested pavement design method based on the visco-elastic properties of asphalt for the national roads of Lithuania, could annually save around €8.24 million, considering the pavement structure class III reconstruction and construction works. Applying these methods to higher classes (III and above) pavement structures more than €25.3 million annual savings could be expected.

Recommendations

1. The advanced pavement design procedure presented in this research should be used for pavement design where equivalent design load A is over 3.0 million axles. In such cases, the visco-elastic behaviour under different load and temperature conditions of asphalt layers should be evaluated predicting pavement performance.
2. During the rehabilitation design it is recommended to evaluate the actual mechanical properties of existing pavement layer and residual pavement life in order to get the most suitable design solution. It is also recommended to apply the Hirsch model to existing asphalt properties. This model provides reasonably accurate prediction of dynamic modulus according to volumetric content of asphalt mixture and dynamic shear modulus of recovered binder.
3. It is recommended to continue research and investigate the existing pavement response (stress and strain) of structure in the future and compare with estimated pavement responses presented in this thesis in order to establish the adequacy of calculations.
4. It is also highly recommended to adjust the performance models corresponding to local materials, mixture types, and exploitation conditions. Determine their compatibility with real road network degradation processes.

Priedai³

A priedas. Sąvokos

B priedas. Bituminio rišiklio šlyties modulio ir fazės kampo kompleksinės kreivės

C priedas. Asfalto mišinių dinaminis tamprumo modulis prie skirtingų temperatūrų ir dažnių

D priedas. Apskaičiuotų asfalto mišinių dinaminio tamprumo modulio kompleksinės kreivės funkcijos

E priedas. Metinė ekonominė nauda vietoje standartizuotų dangos konstrukcijų naudojant optimizuotas konstrukcija

F priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje

G priedas. Autorės mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

³ Priedai pateikti elektroninėje laikmenoje

Rita KLEIZIENĖ

NESTANDŽIOS DANGOS KONSTRUKCIJOS
MODELIAVIMAS ĮVERTINANT TAMPRIAI KLAMPIAS
ASFALTO SAVYBES

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
Statybos inžinerija (02T)

DESIGN OF FLEXIBLE PAVEMENT BASED ON
ASPHALT VISCO-ELASTIC PROPERTIES

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Civil Engineering (02T)

2016 11 08. 15,0 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „BMK leidykla“
J. Jasinskio g. 16, 01112 Vilnius